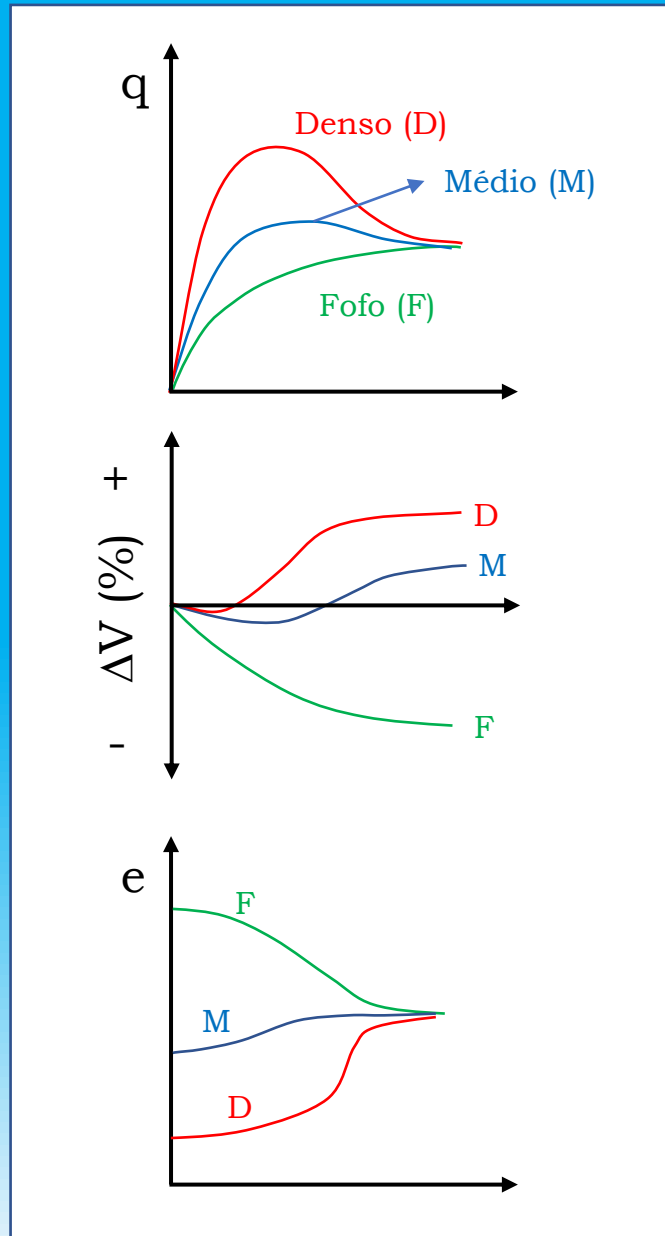


Solos compactados

Fernando A. M. Marinho

2023

Por que Compactar os Solos?



Objetivos da Compactação

- Aumentar a capacidade suporte do solo.
- Diminuir os recalques indesejados nas estruturas.
- Controlar a variação de volume.
- Reduzir ou controlar a condutividade hidráulica.
- Aumentar a resistência do solo para valores adequados ao projeto.

Área de empréstimo

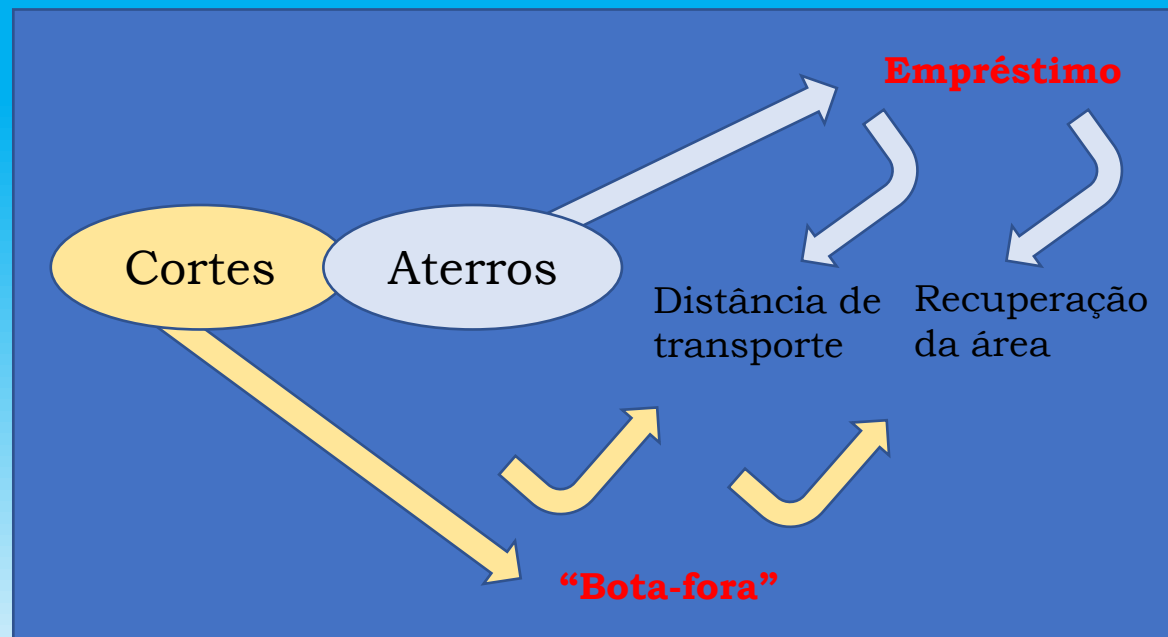


Área de Empréstimo

A escolha da área de empréstimo deve atender às necessidades da obra:

- Tipo de solo (Técnico)
- Volume necessário (Técnico)
- Distância de transporte (Econômico)

Deve-se otimizar



Área de empréstimo

A densidade do material na área de empréstimo é, em geral, diferente da que será utilizada na compactação.

Deve-se considerar as seguintes perdas:

- Durante a remoção
- Transporte
- Material inadequado (e.g. pedregulhos)



$$V_{\text{empréstimo}} = \frac{\gamma_{d,\text{aterro}}}{\gamma_{d,\text{empréstimo}}} V_{\text{requerido(aterro)}} + \frac{W_{\text{perdas}}}{\gamma_{d,\text{empréstimo}}}$$

Estimativa

$$V_{\text{empréstimo}} = \omega V_{\text{requerido (aterro)}}$$

ω varia de 1,1 a 1,15 para solos

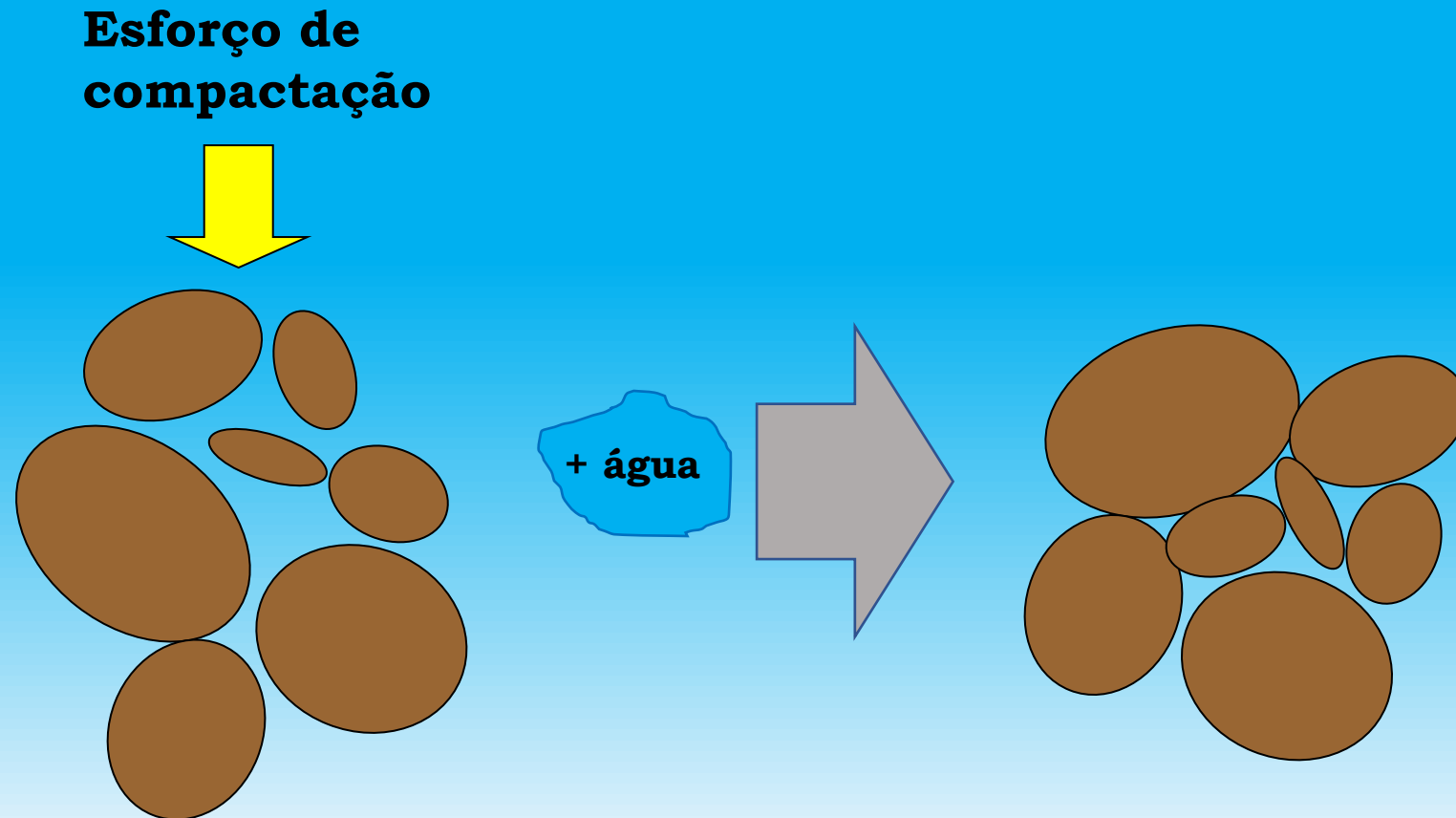


Fatores que Controlam a Compactação

1. Energia de compactação.
2. Tipo de solo e distribuição granulométrica.
3. Teor de umidade.

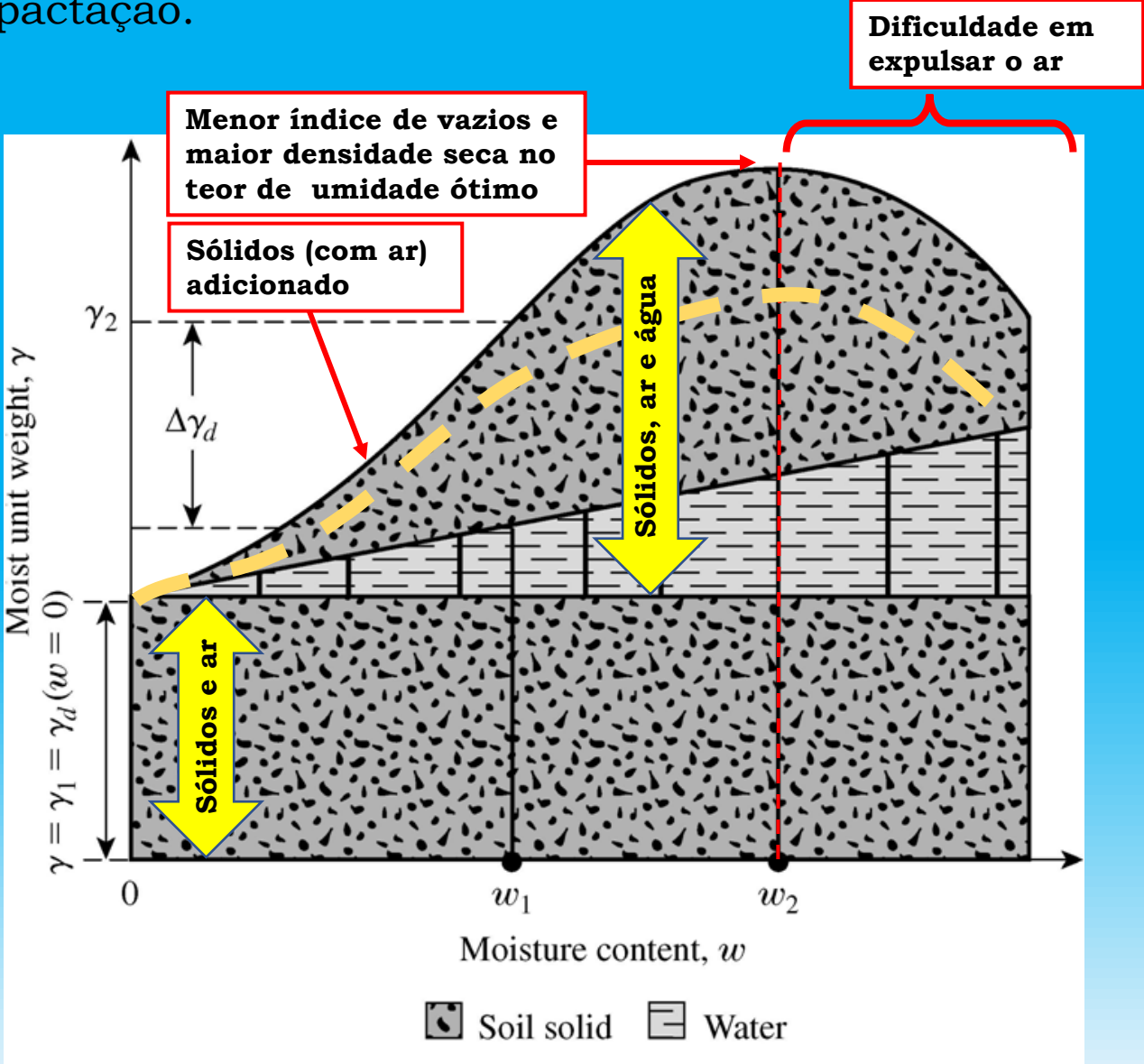
O que é Compactação?

É uma técnica de melhoramento do solo, onde o solo é densificado pela aplicação de um esforço externo. O solo reduz o índice de vazios pela saída de ar.

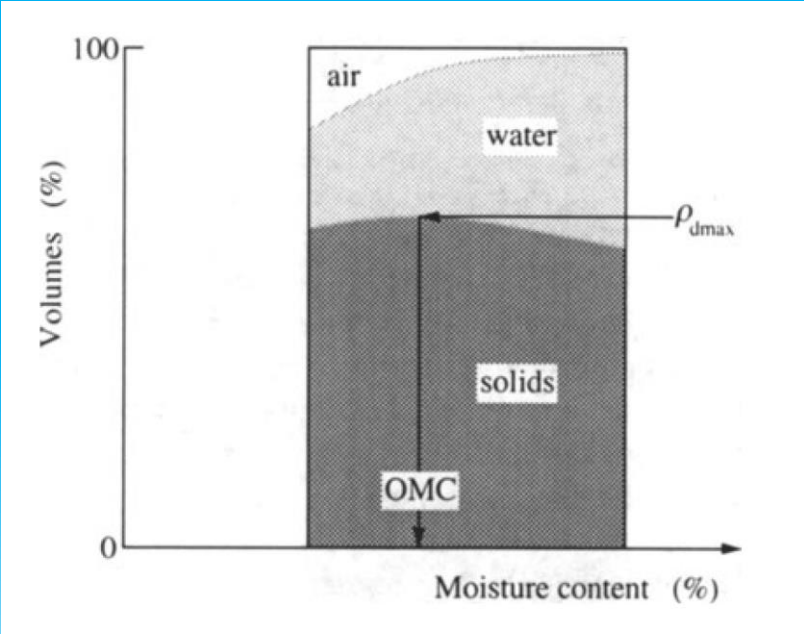


Curva de Compactação

As três fases durante o processo de compactação.

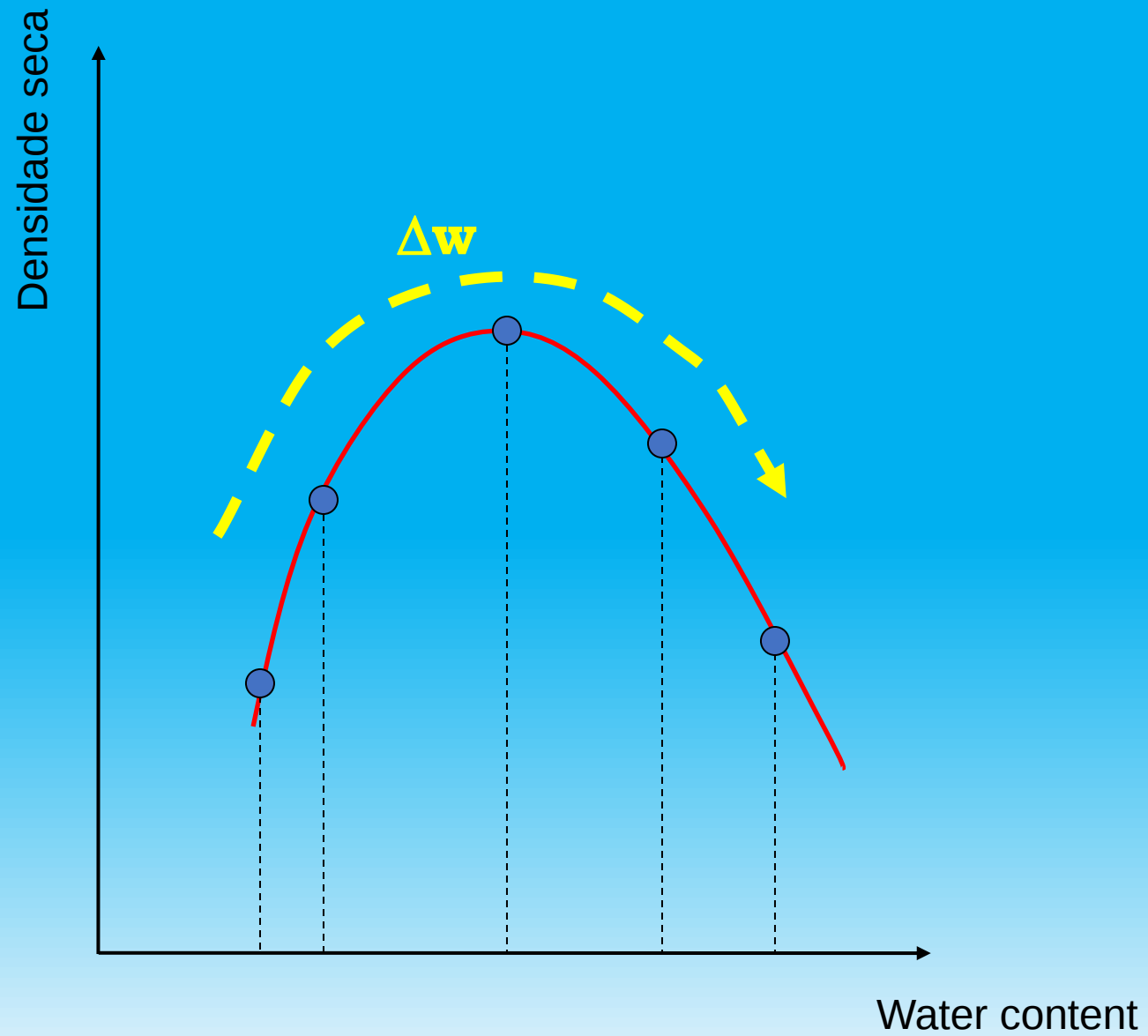


Das (2012)

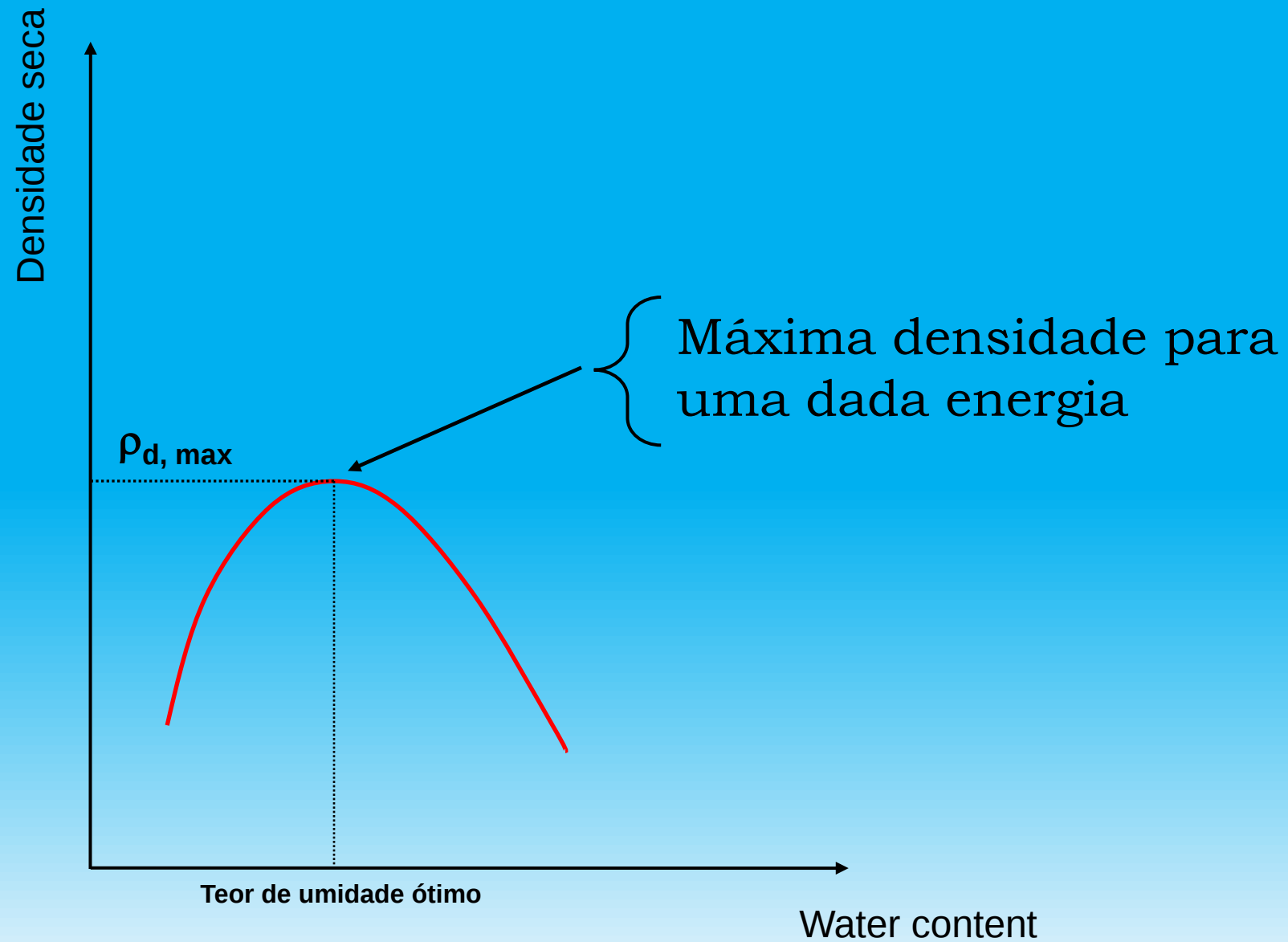


Barnes (2000)

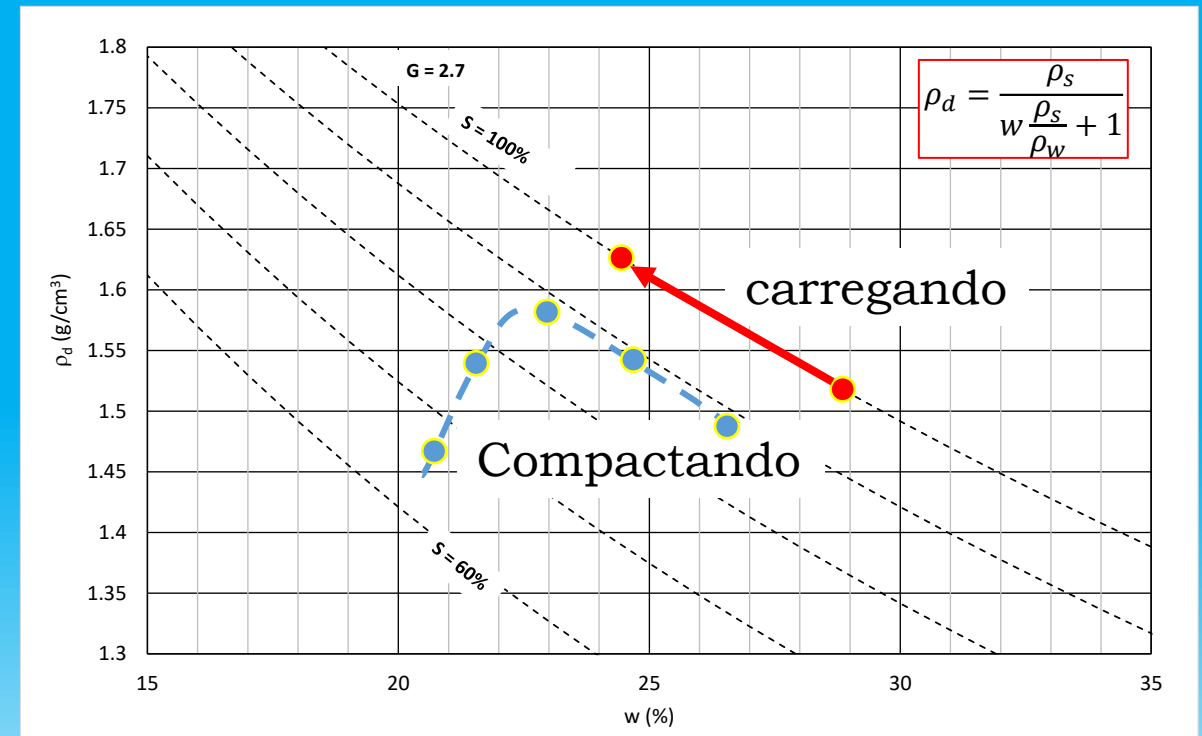
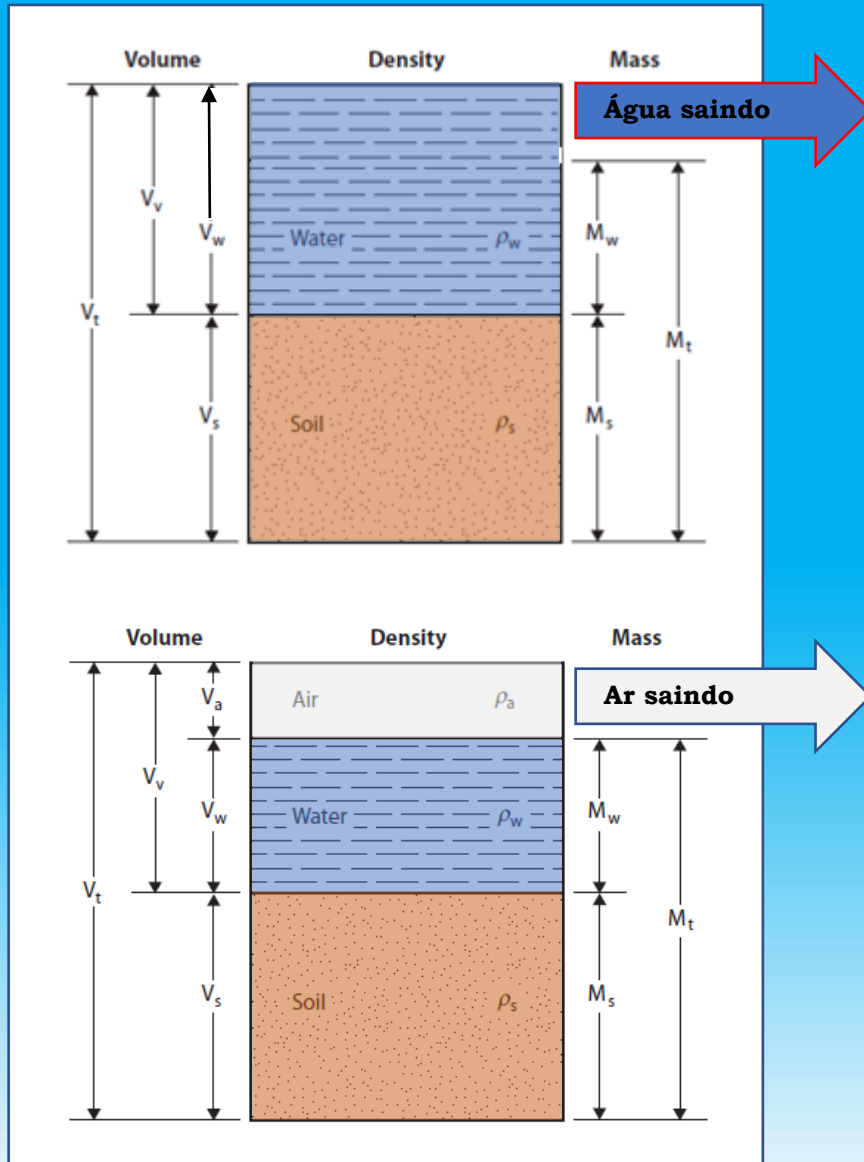
A Curva de Compactação



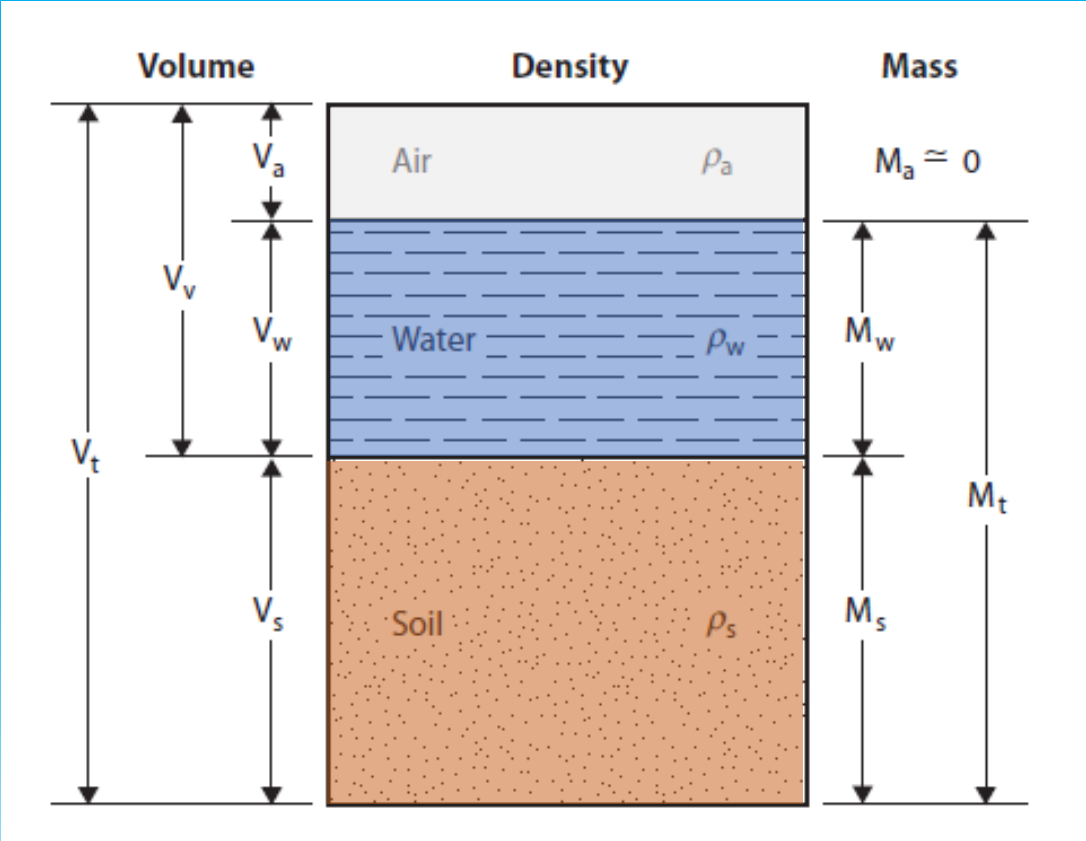
Curva de Compactação



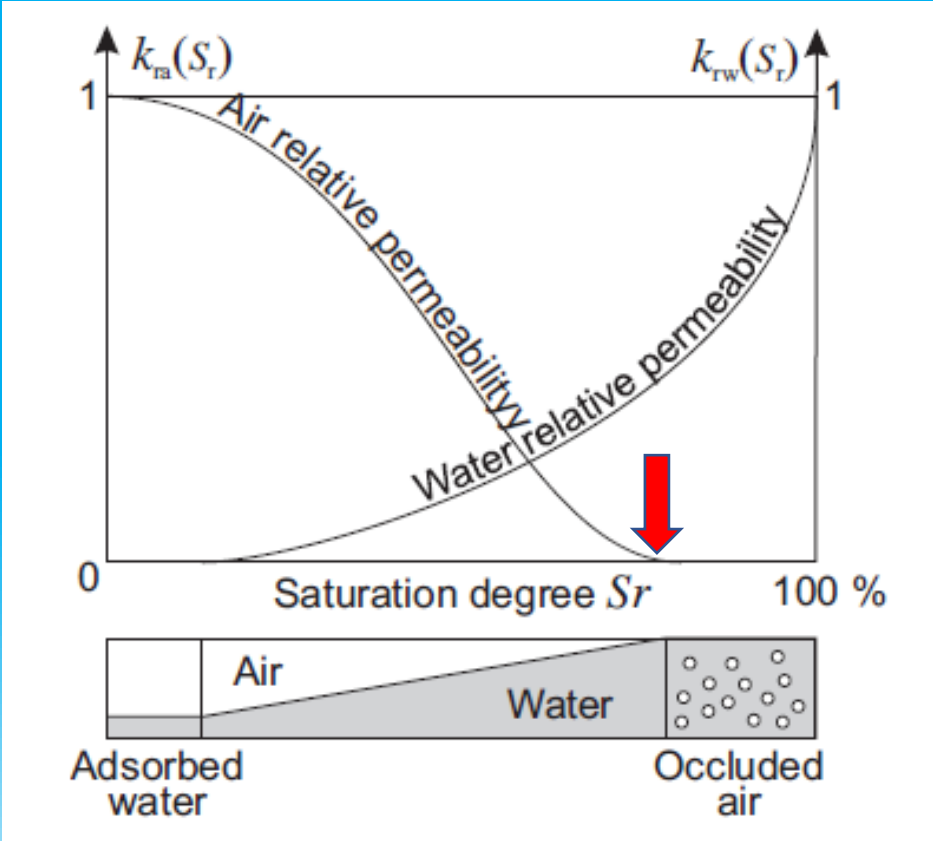
O conceito de adensamento e conceito de compactação



Conceitos básicos

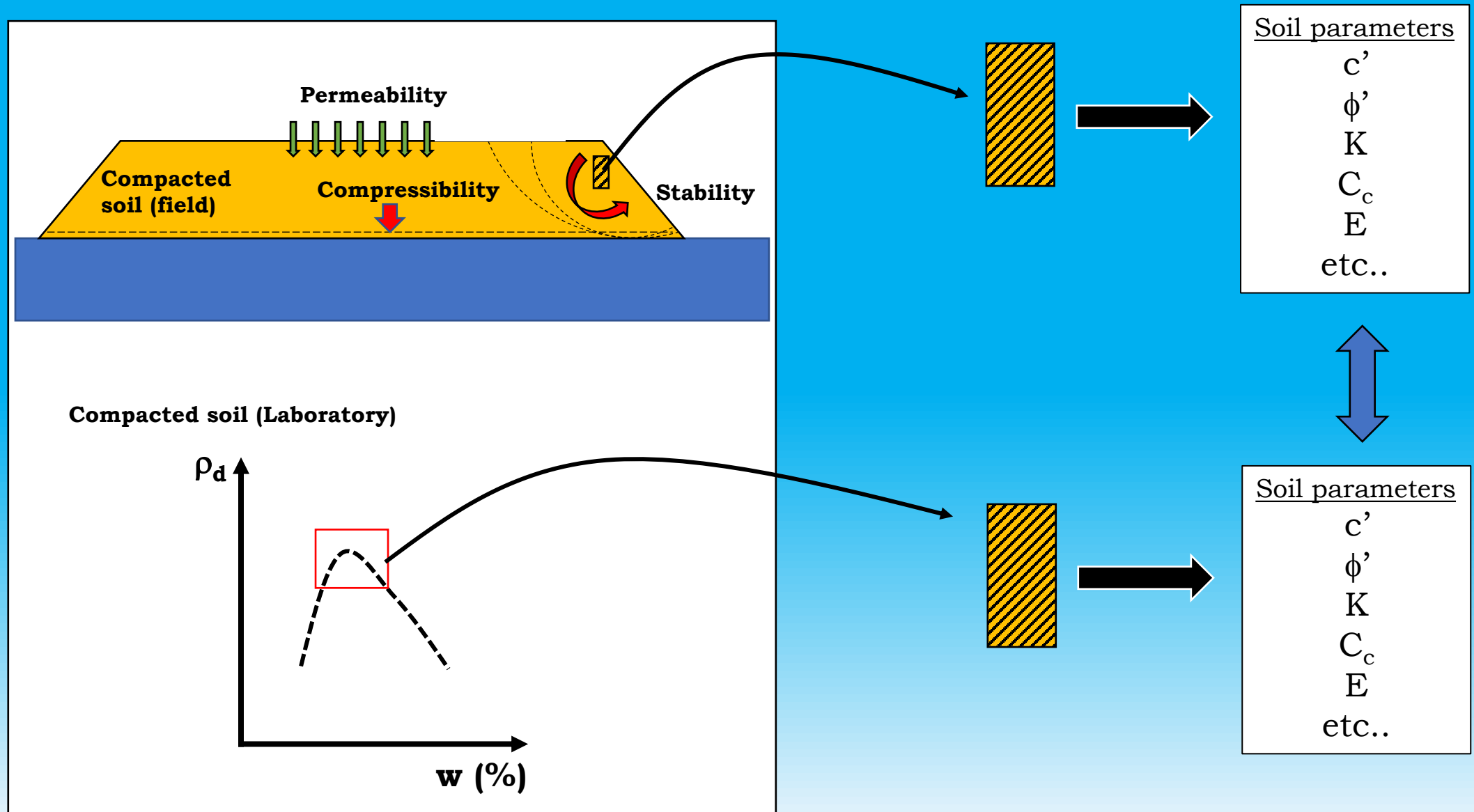


ASTM (2011)

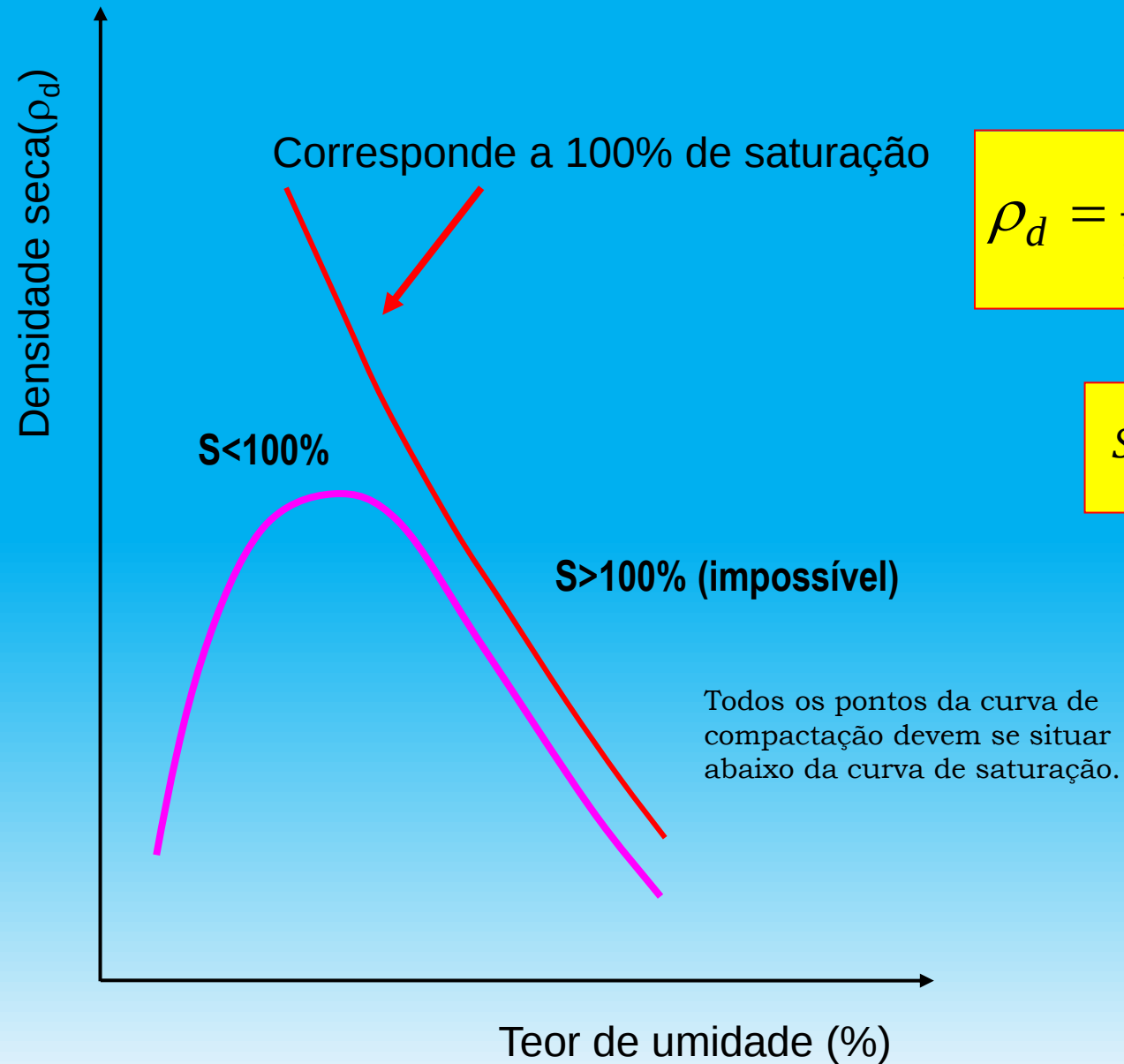


Caicedo (2019)

Parâmetros do solo, Comportamento de campo e compactação no laboratório



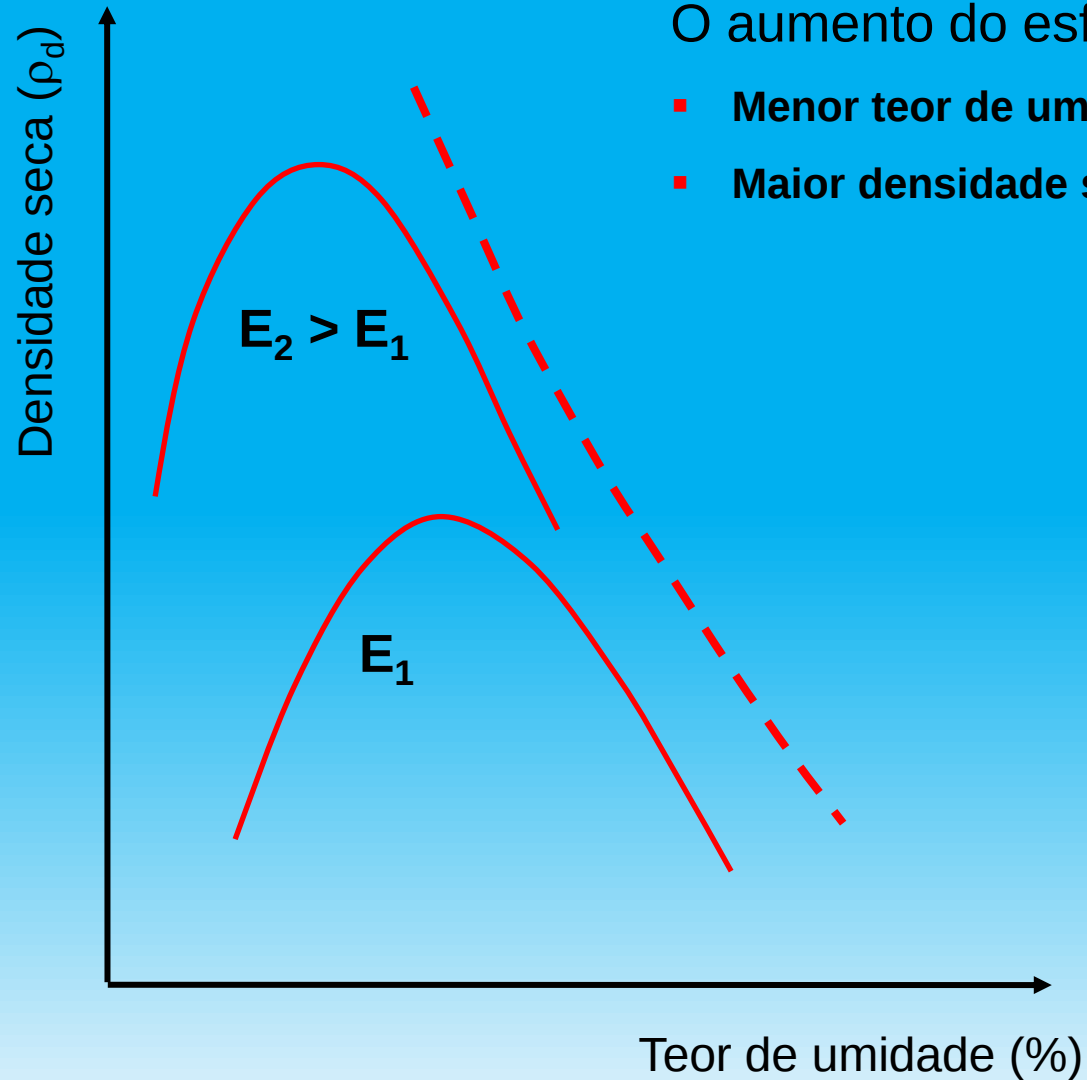
Curva de 100% de saturação



$$\rho_d = \frac{G_s \rho_w}{1 + wG_s}$$

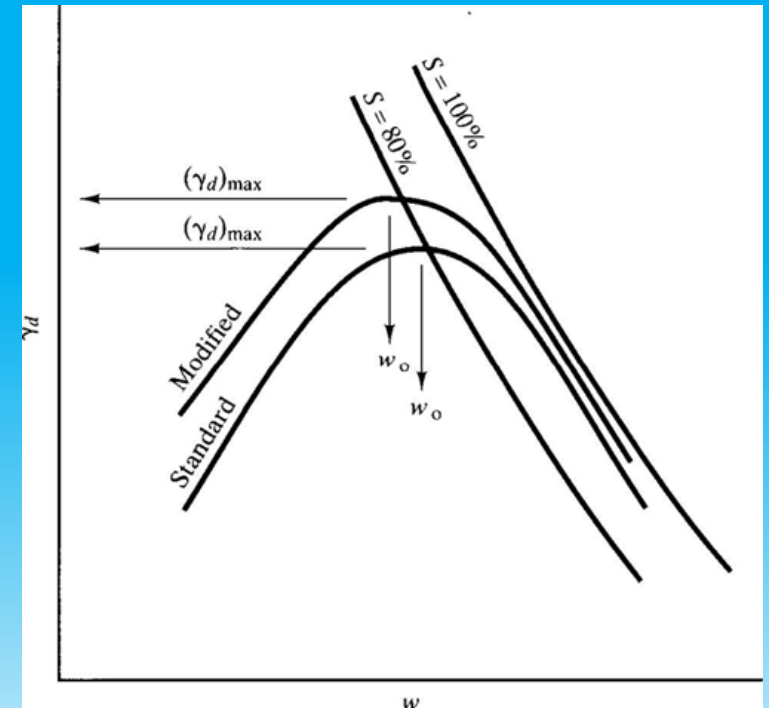
$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

Efeito da Energia (esforço) de Compactação



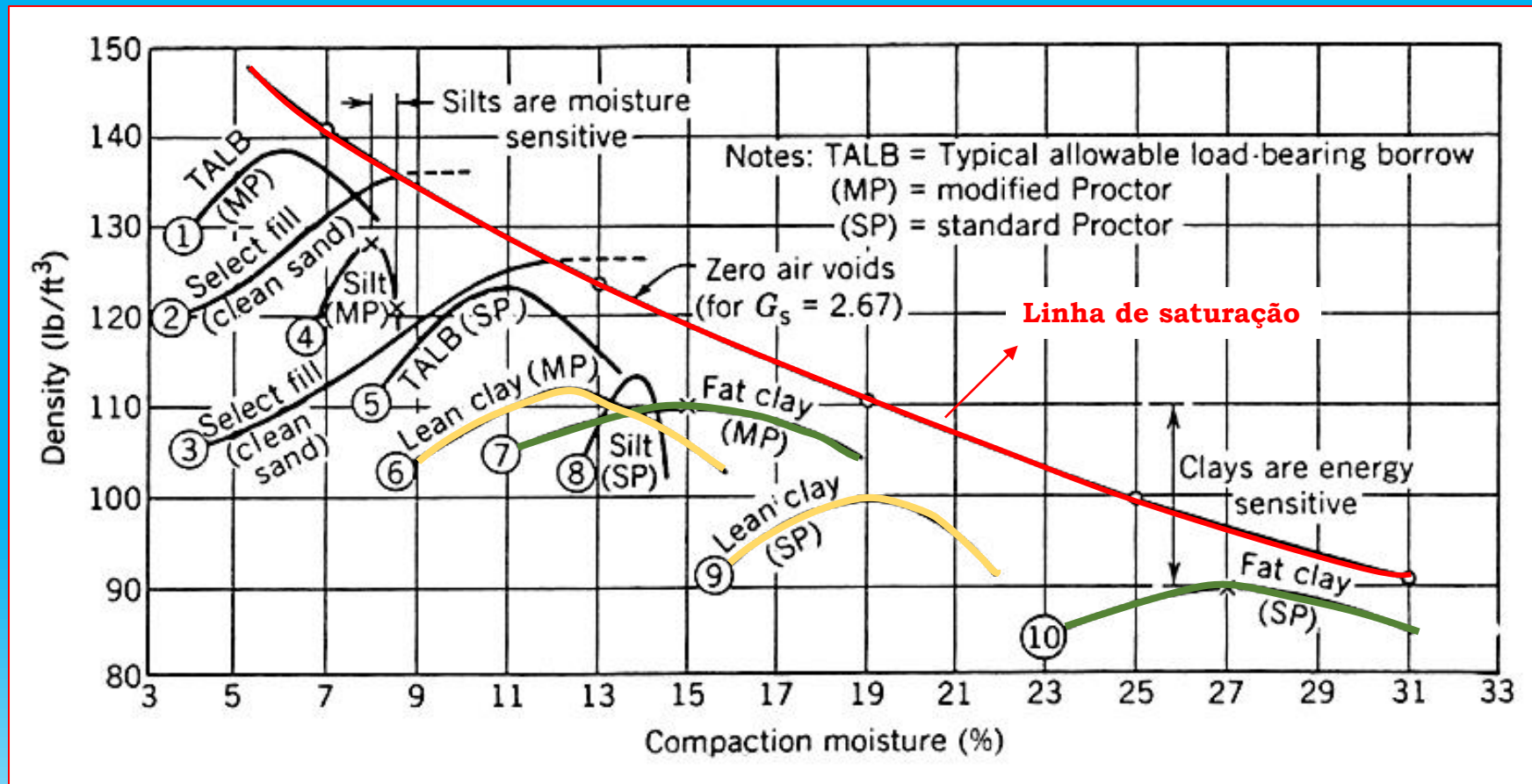
O aumento do esforço de compactação causa:

- Menor teor de umidade ótimo
- Maior densidade seca máxima.

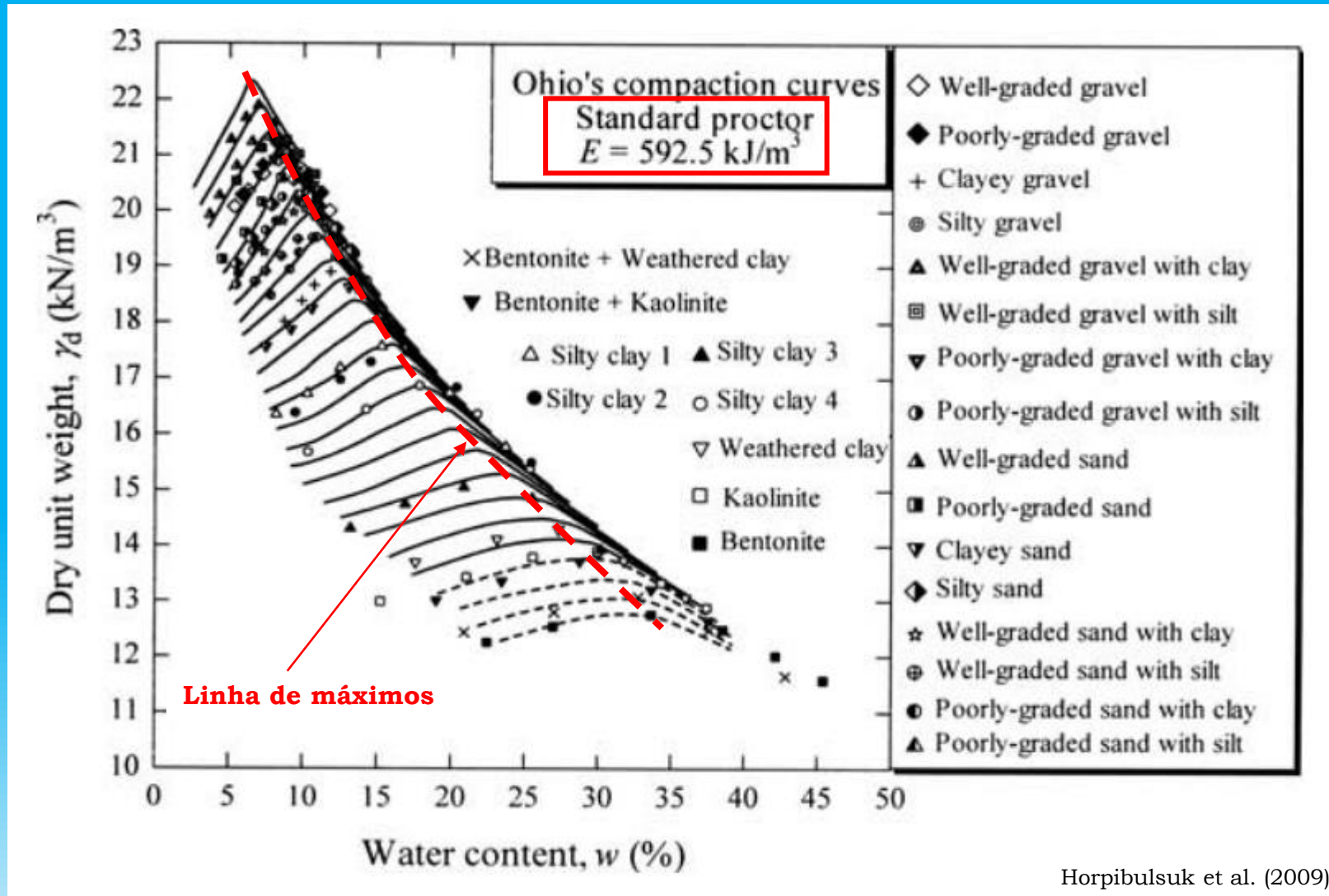


Lembrar que a energia no campo depende de vários fatores

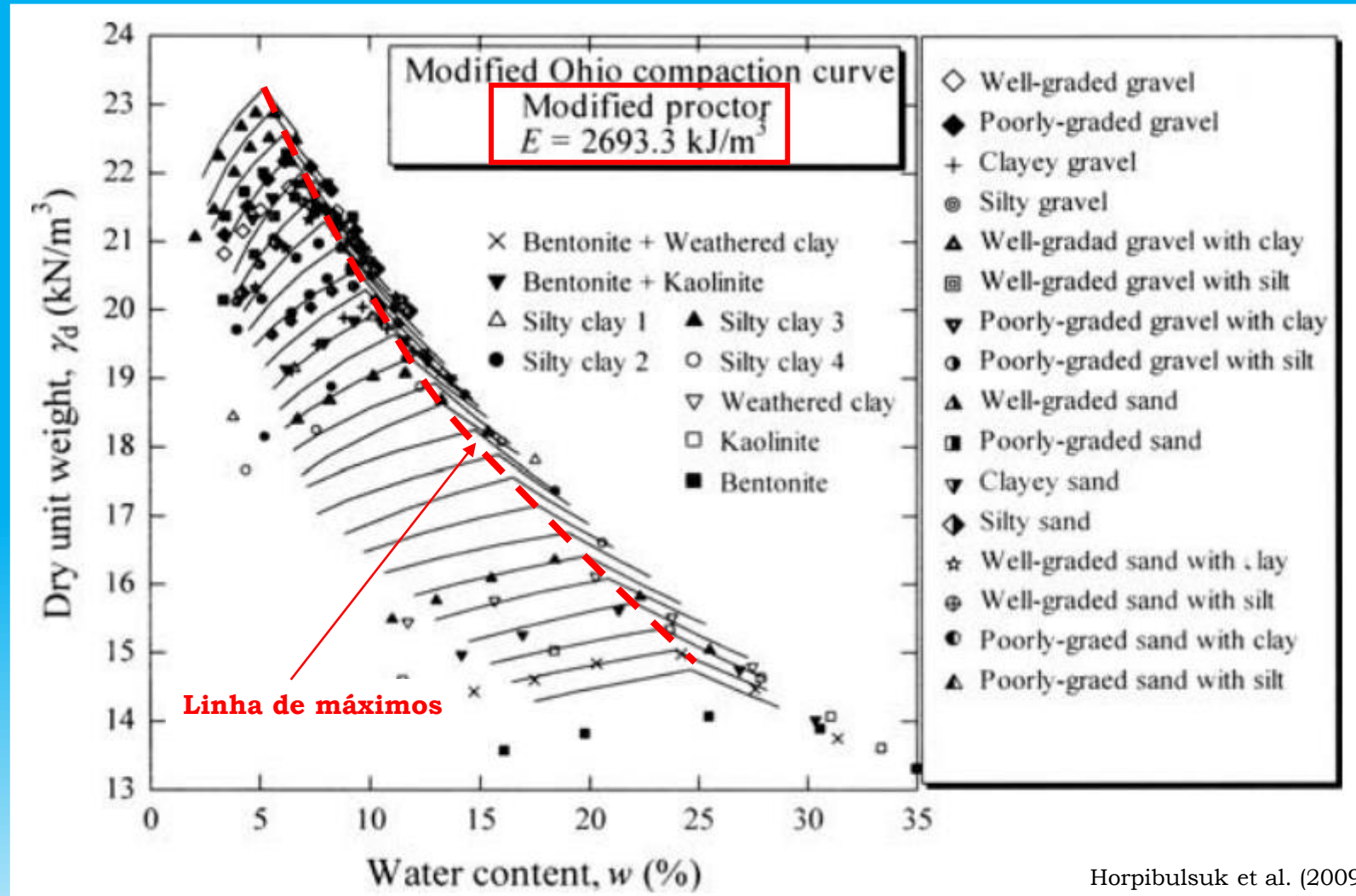
Efeito do Tipo de Solo e Energia de Compactação



Efeito do Tipo de Solo e Energia de Compactação

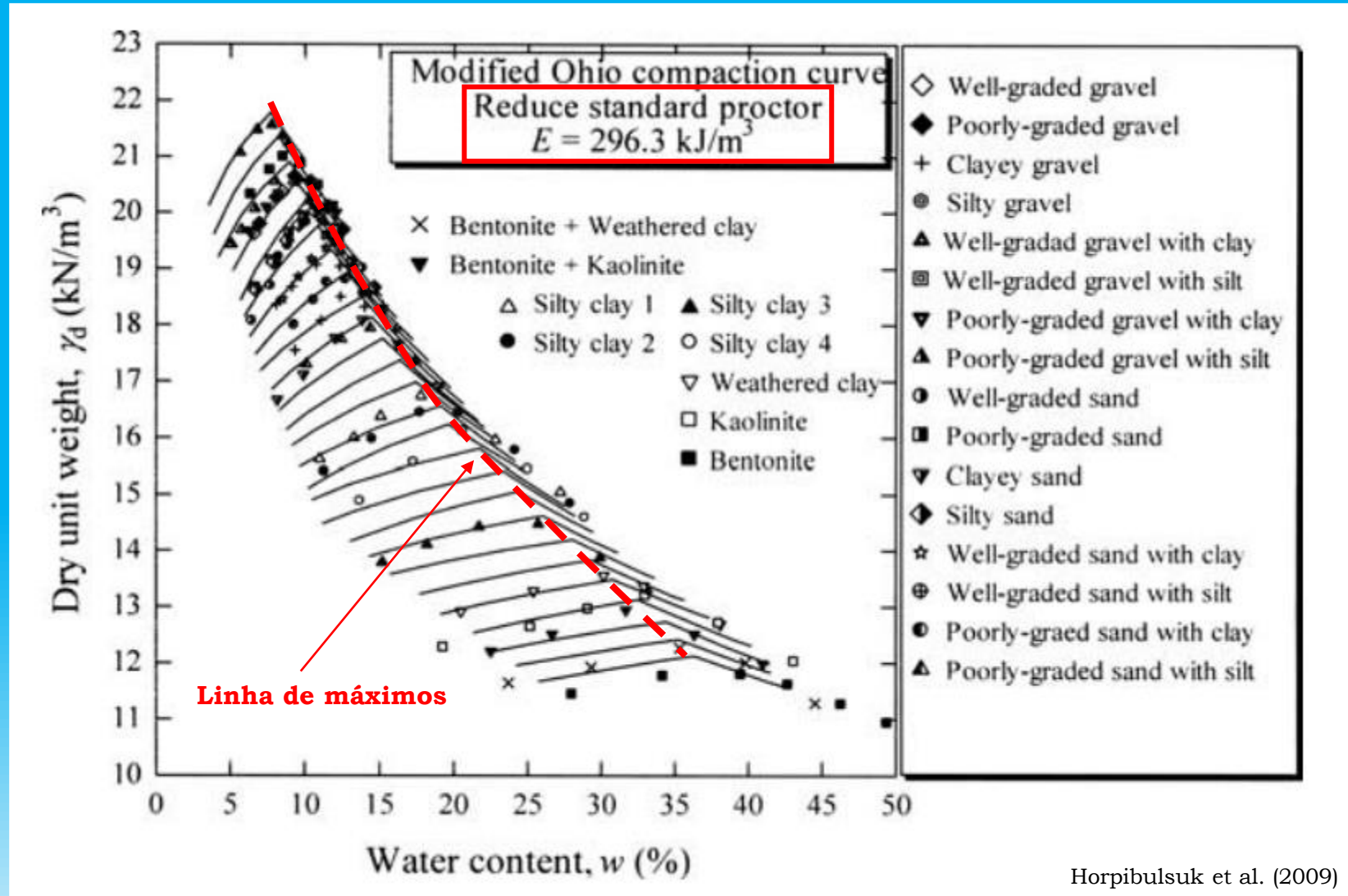


Efeito do Tipo de Solo e Energia de Compactação

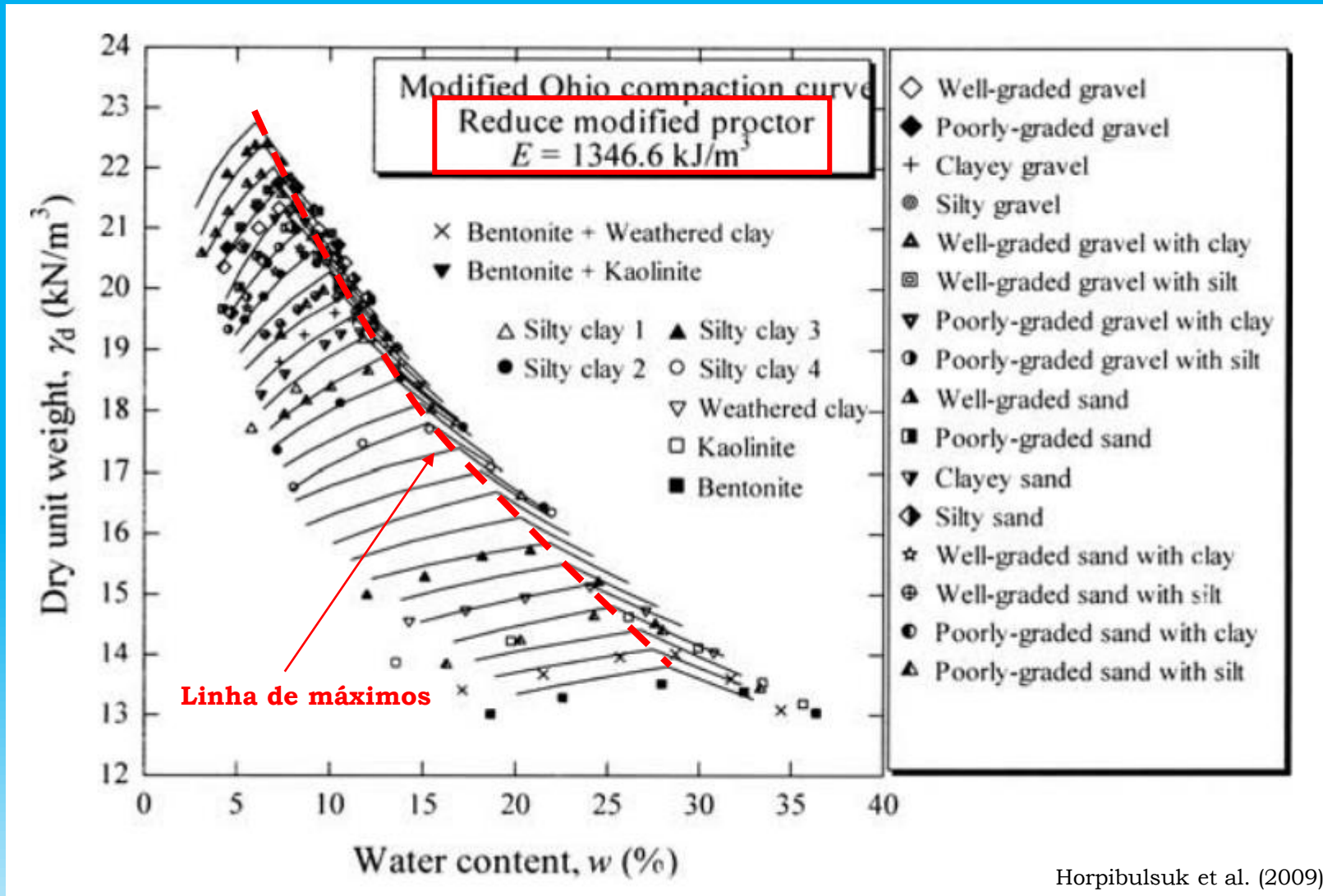


Horpibulsuk et al. (2009)

Efeito do Tipo de Solo e Energia de Compactação

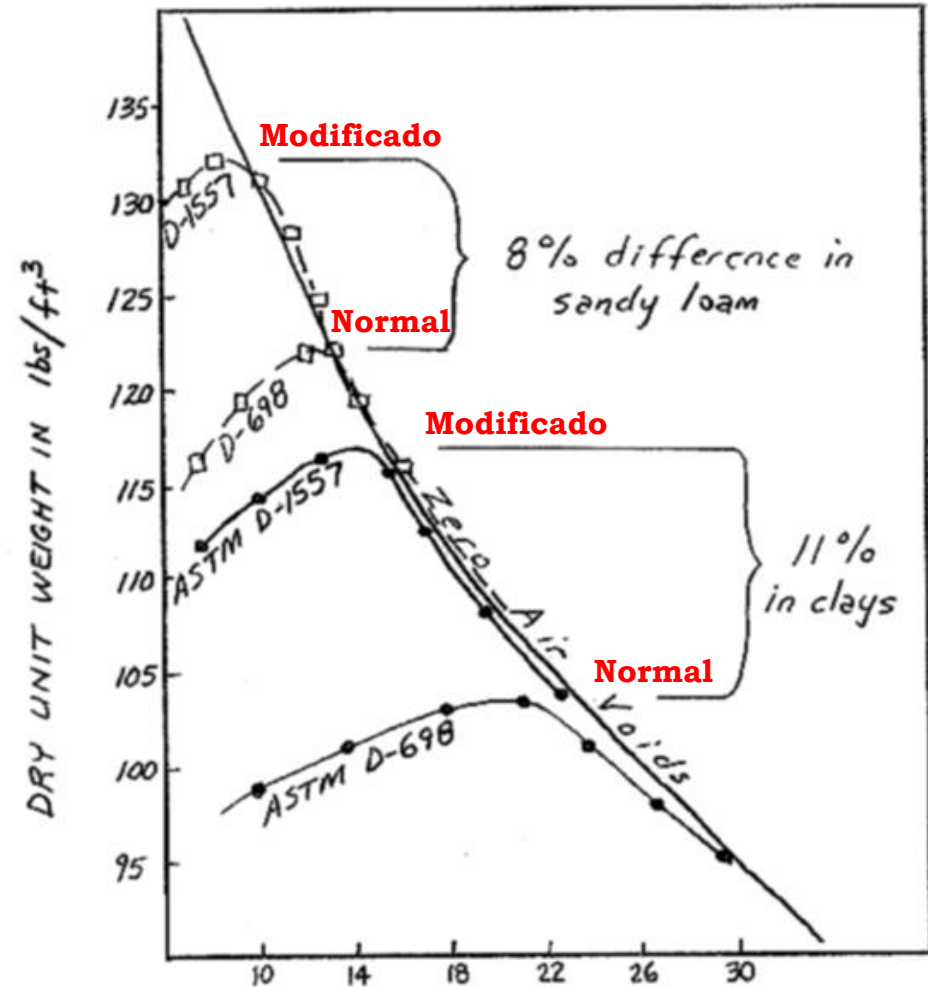


Efeito do Tipo de Solo e Esforço de Compactação

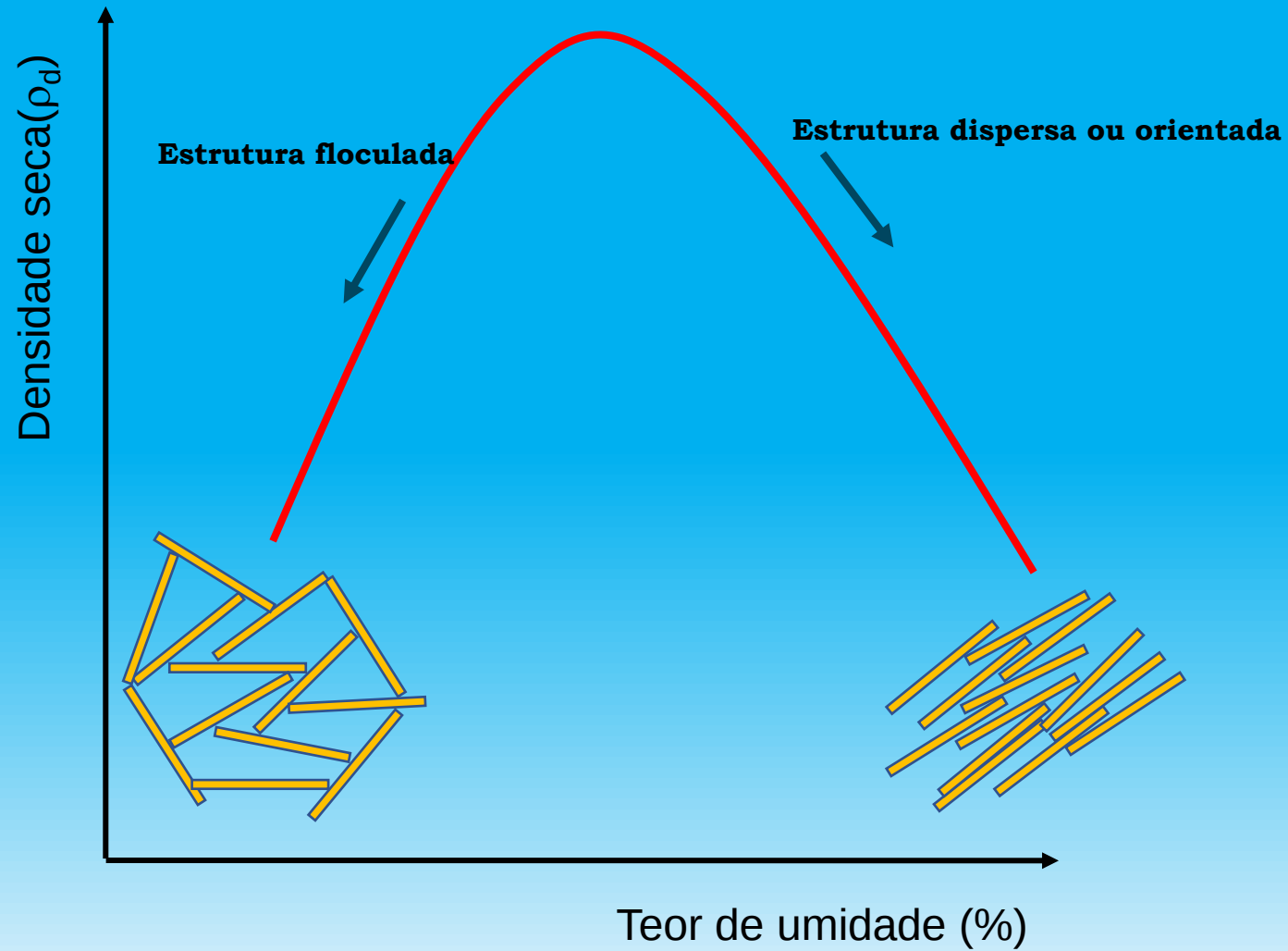


Efeito do Tipo de Solo e Energia de Compactação

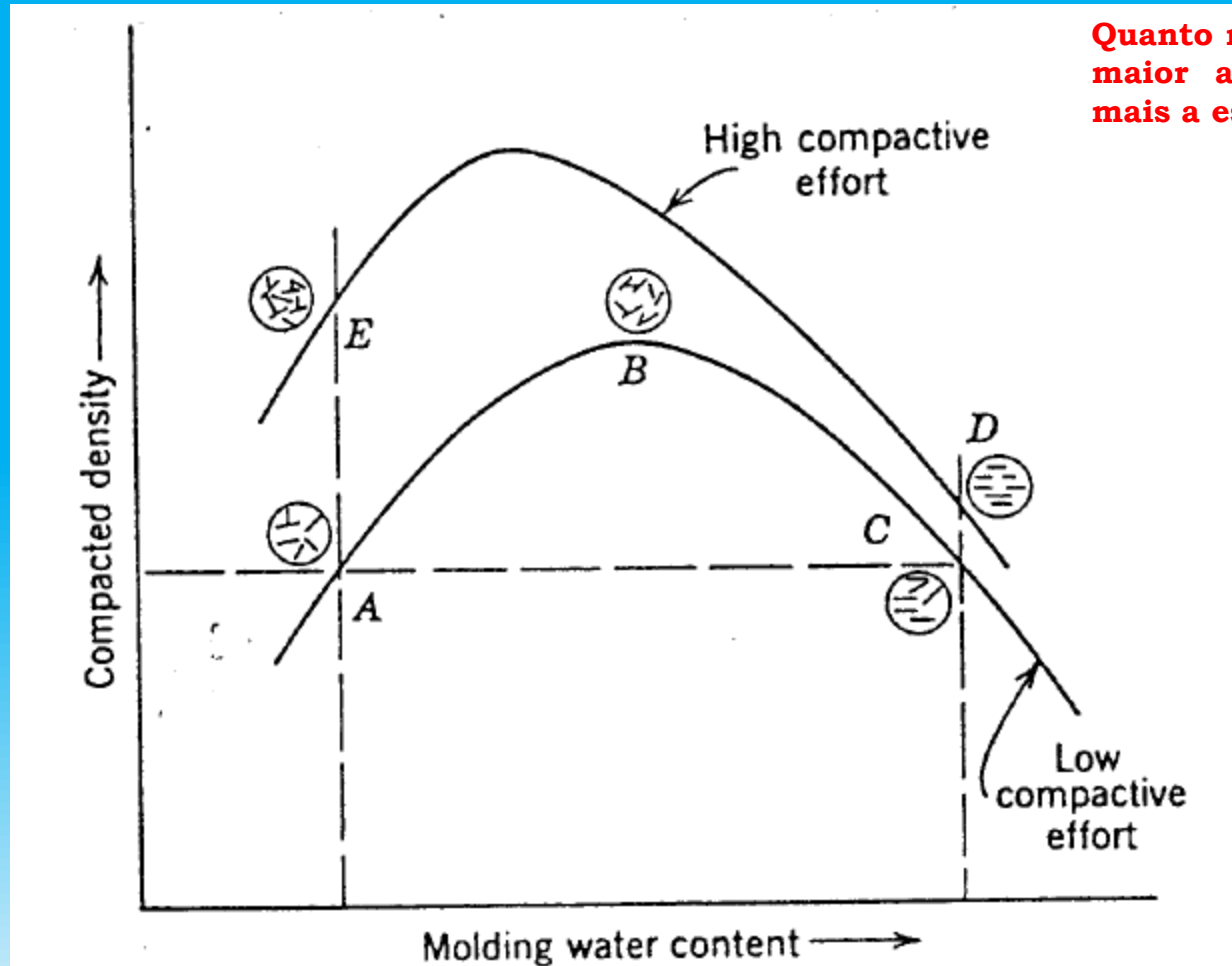
COMPARISON BETWEEN ASTM D-698-70 and ASTM D-1557-78



Estrutura do solo compactado

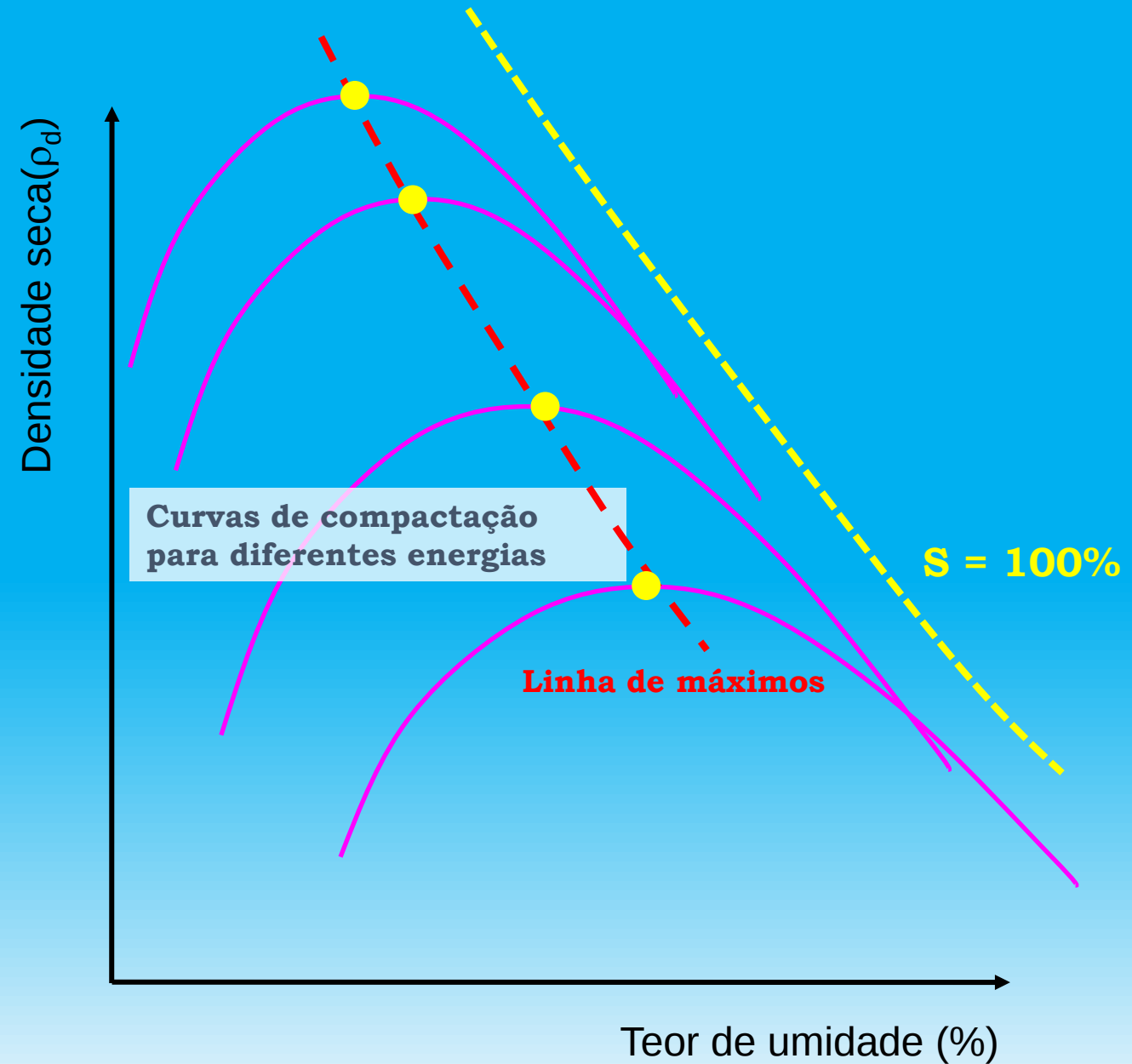


Estrutura do solo compactado

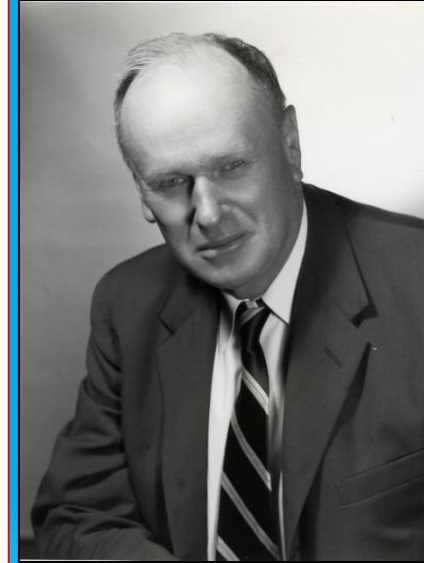
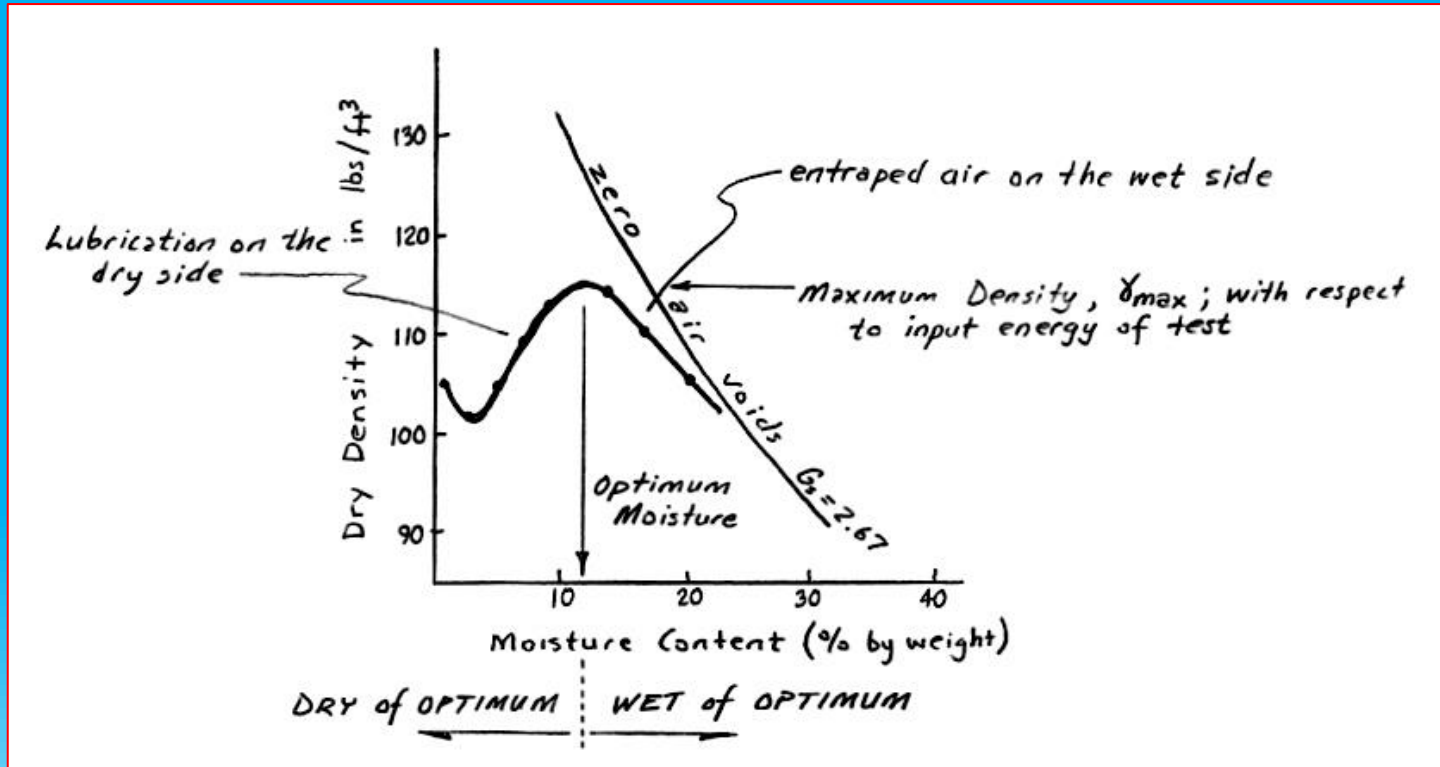


Quanto maior o teor de umidade ou maior a energia de compactação mais a estrutura é dispersa

Linha de Máximos ou de Ótimos

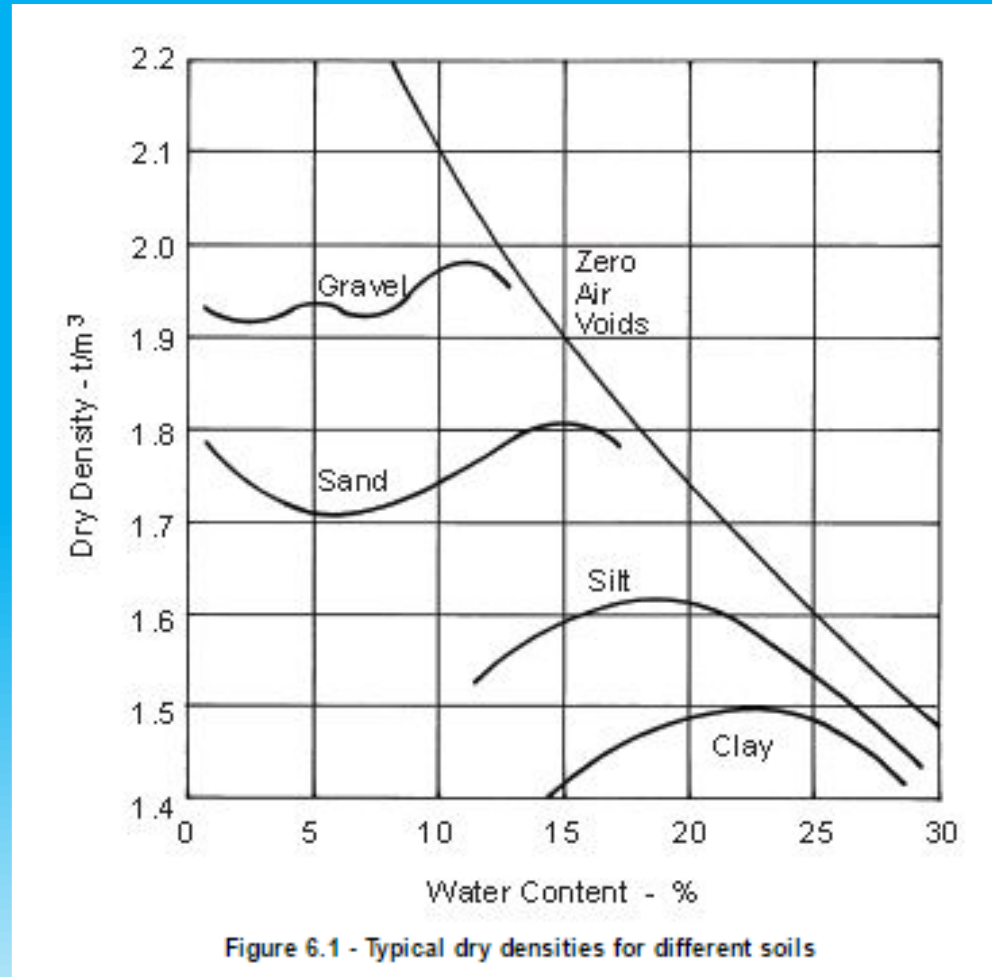


Ralph Proctor



Ralph Proctor 1894-1962

Características das curvas de Compactação



Ensaio de Compactação (laboratório)

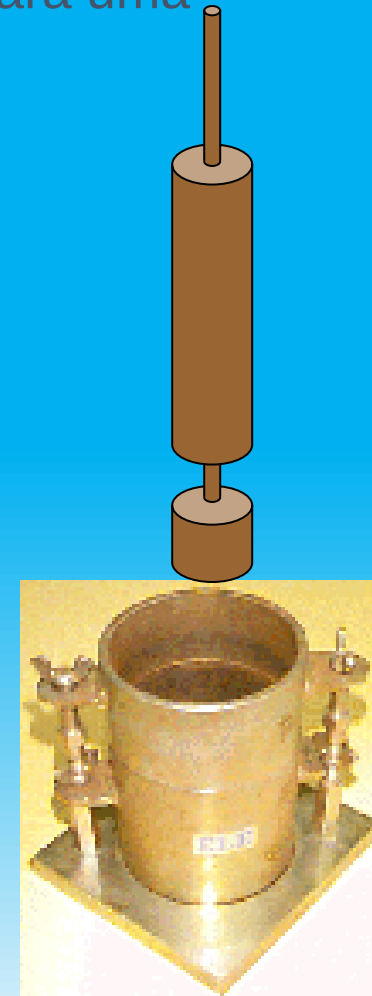
O objetivo do ensaio é obter a curva de compactação e definir o teor de umidade ótimo e densidade seca máxima para uma energia especificada.

Proctor Normal:

- 3 camadas
- 26 golpes por camada
- Soquete de 2.5 kg
- Altura de queda 305 mm

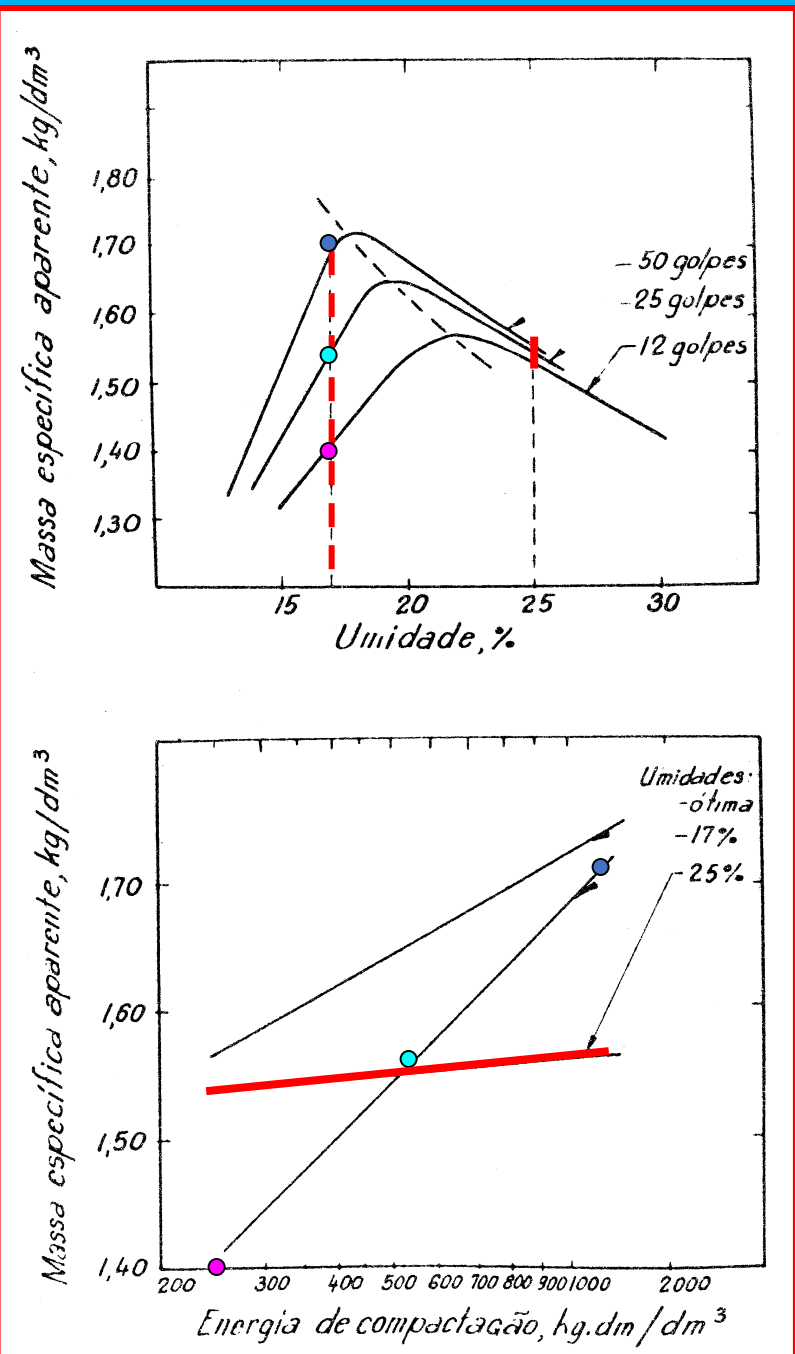
Proctor Modificado:

- 5 camadas
- 27 golpes por camada
- Soquete de 4.5 kg
- Altura de queda 457 mm



Volume do molde 1000 ml

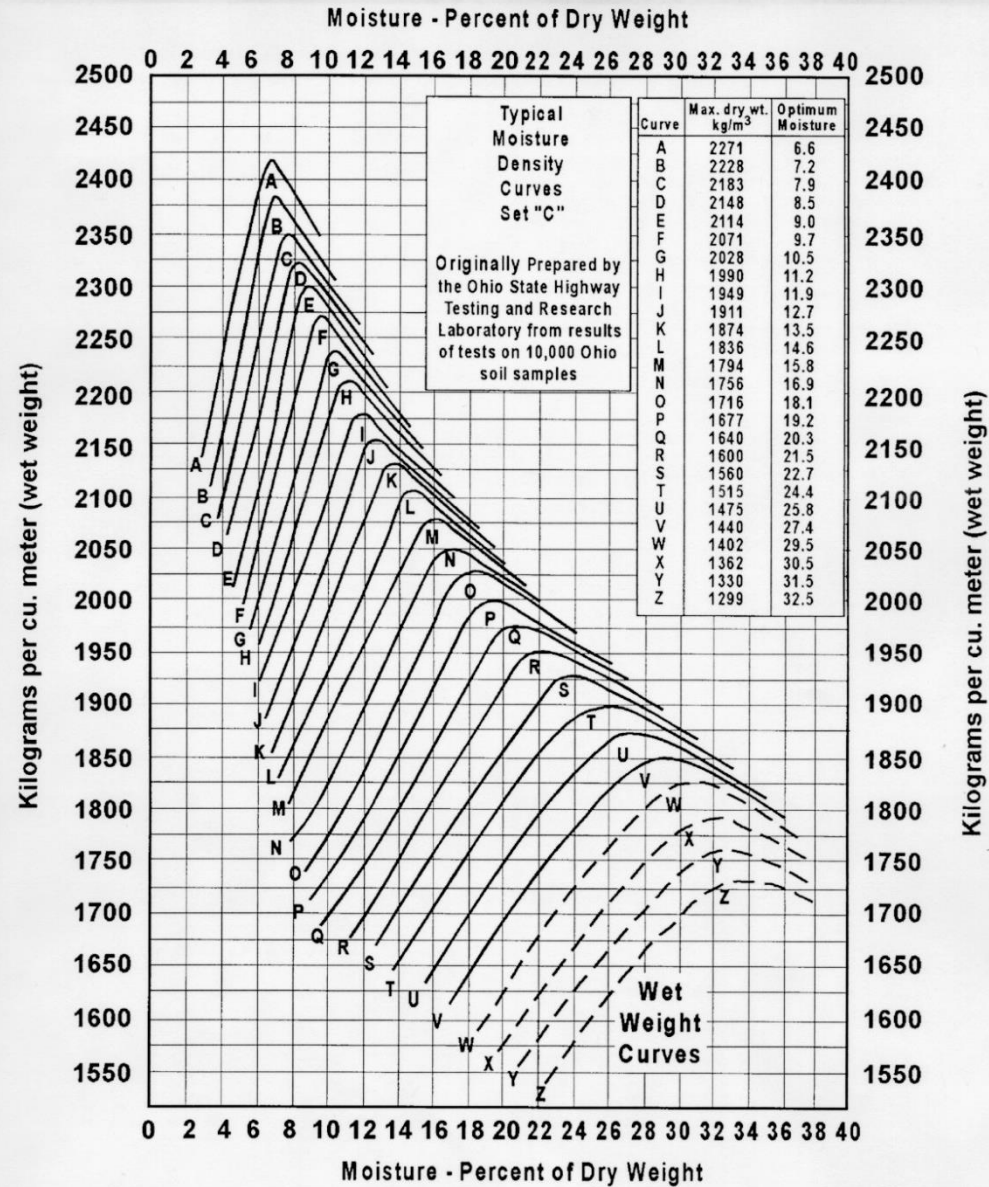
Características das curvas de Compactação



Curvas de compactação com três energias.

Variação da massa específica com a energia de compactação para três teores de umidade.

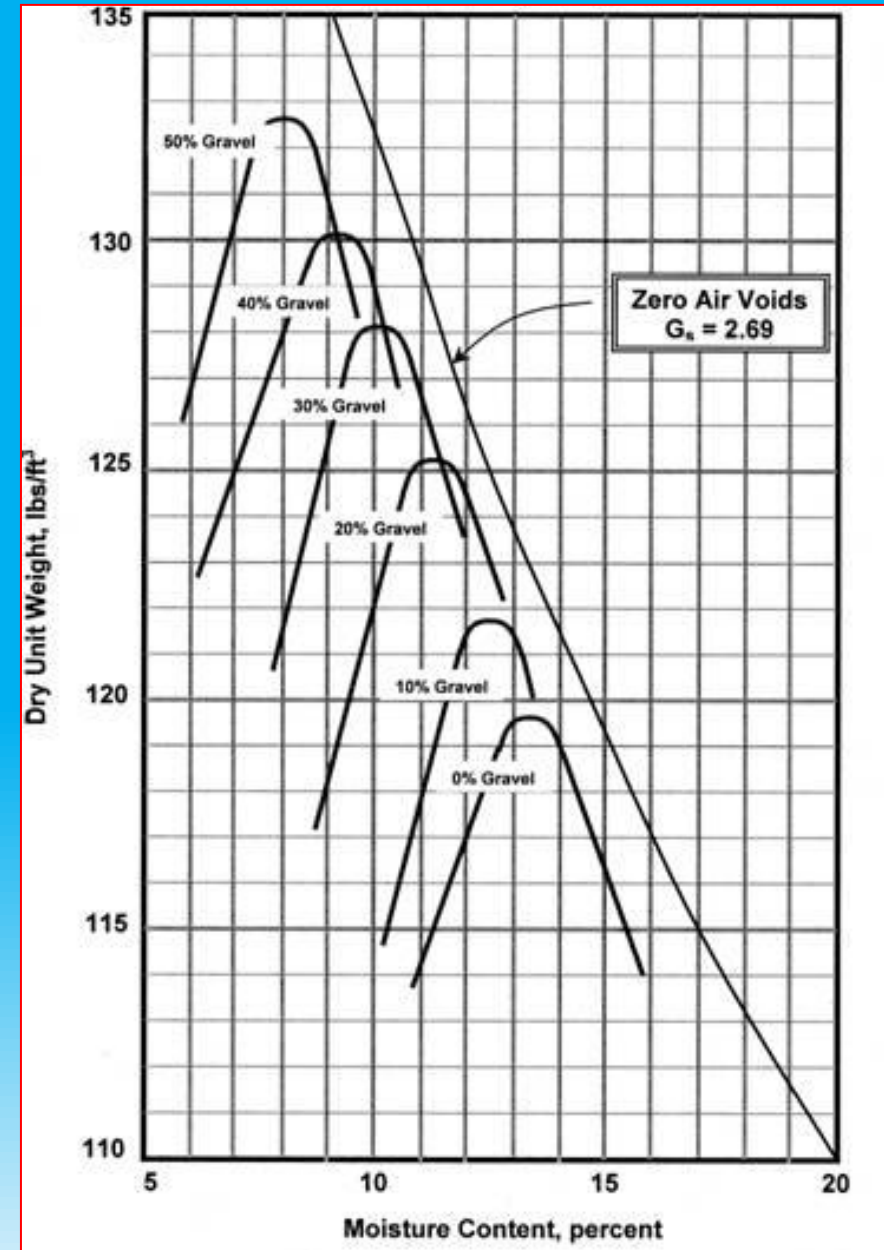
Curvas típicas dos solos de Ohio



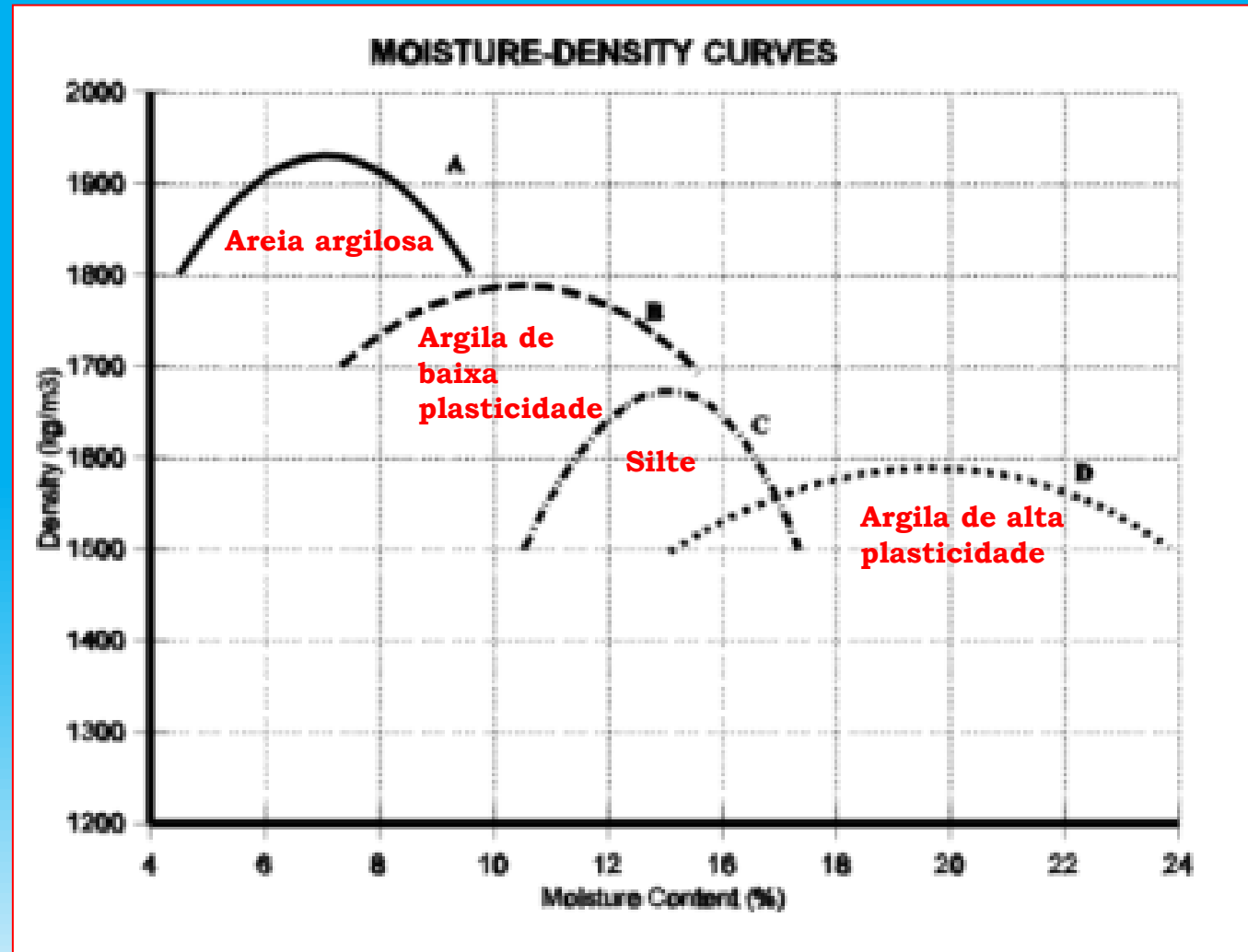
* Computer re-drawn February 1996

Use for C-90M + C-135B-M

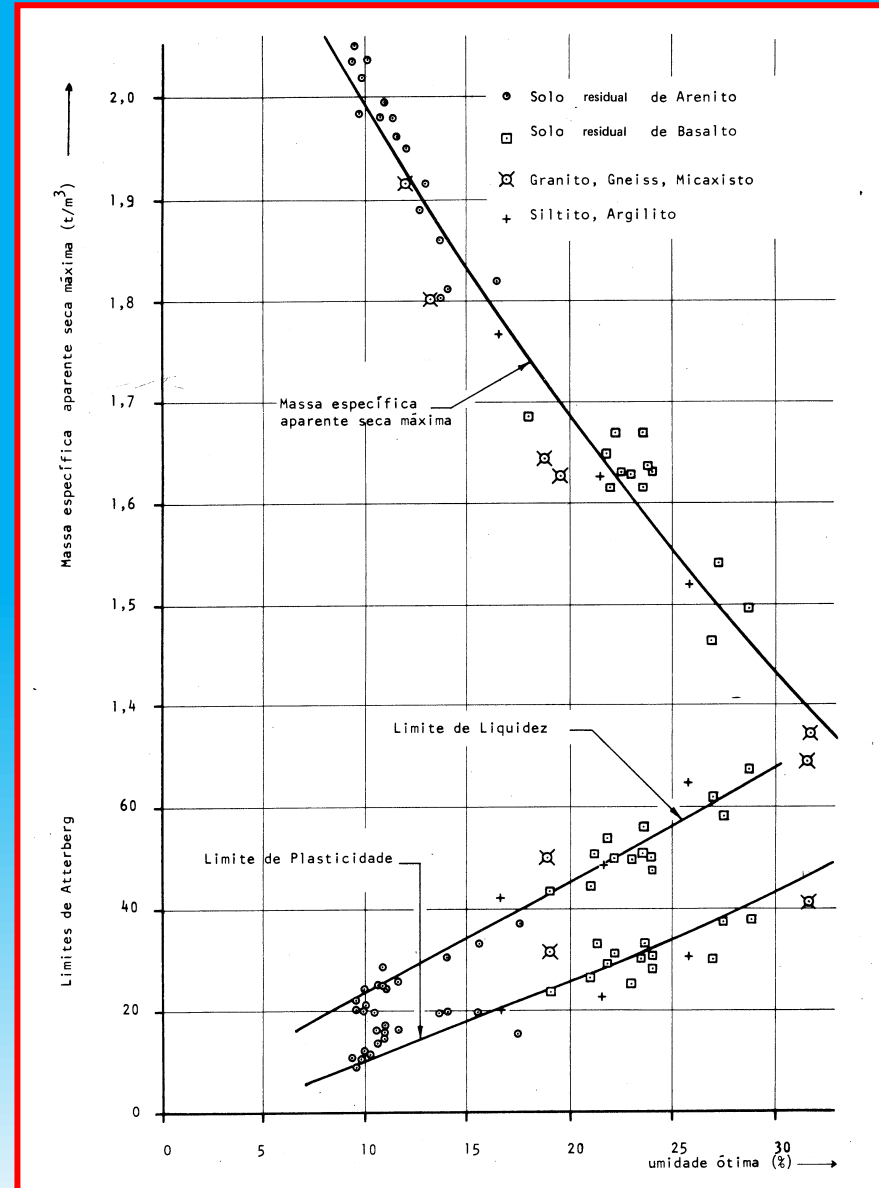
Efeito da presença de material mais grosso



Efeito do tipo de solo



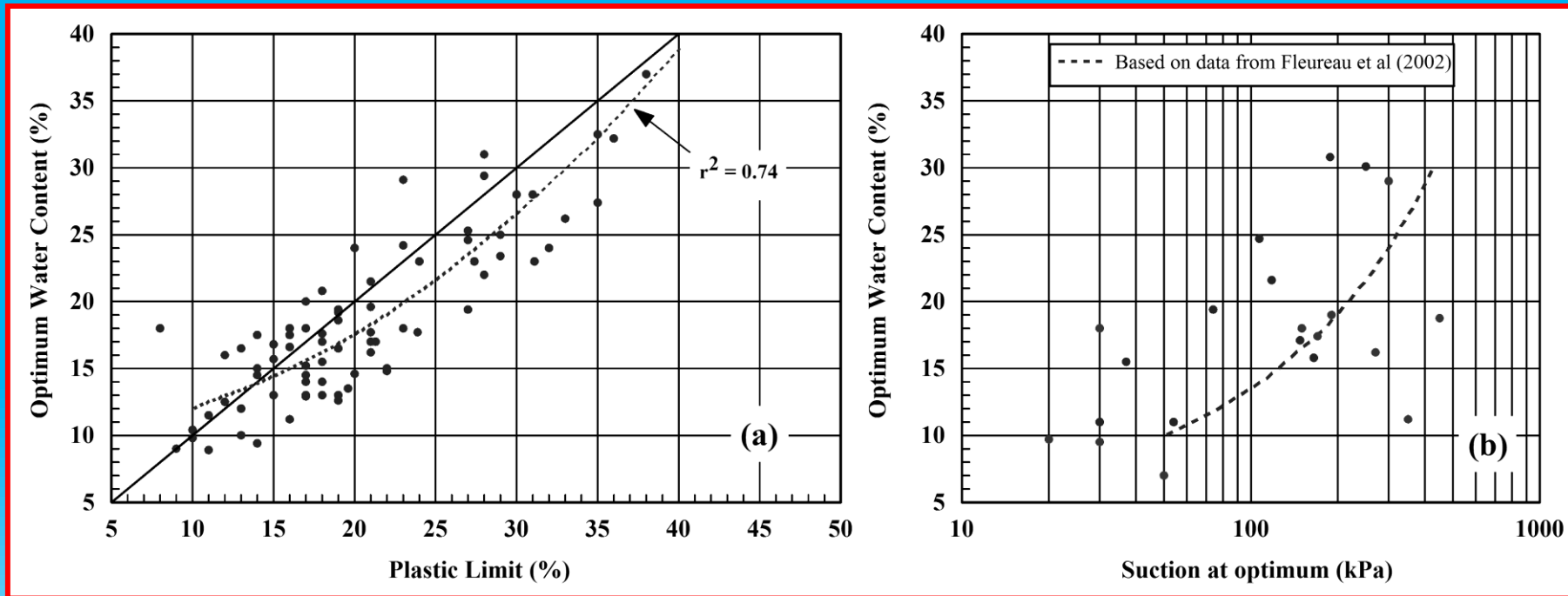
Correlação entre parâmetros de compactação e limites de Atterberg (Vargas, 1981)



$$\gamma_u = \gamma_d (1 + w)$$

O valor de w_{ot} pode ser estimado por correlações estatísticas entre umidades ótimas e densidade úmida.

Correlação entre parâmetros de compactação, limites de Atterberg e sucção na umidade ótima.



Marinho & Oliveira
(2011)

Compactação no campo

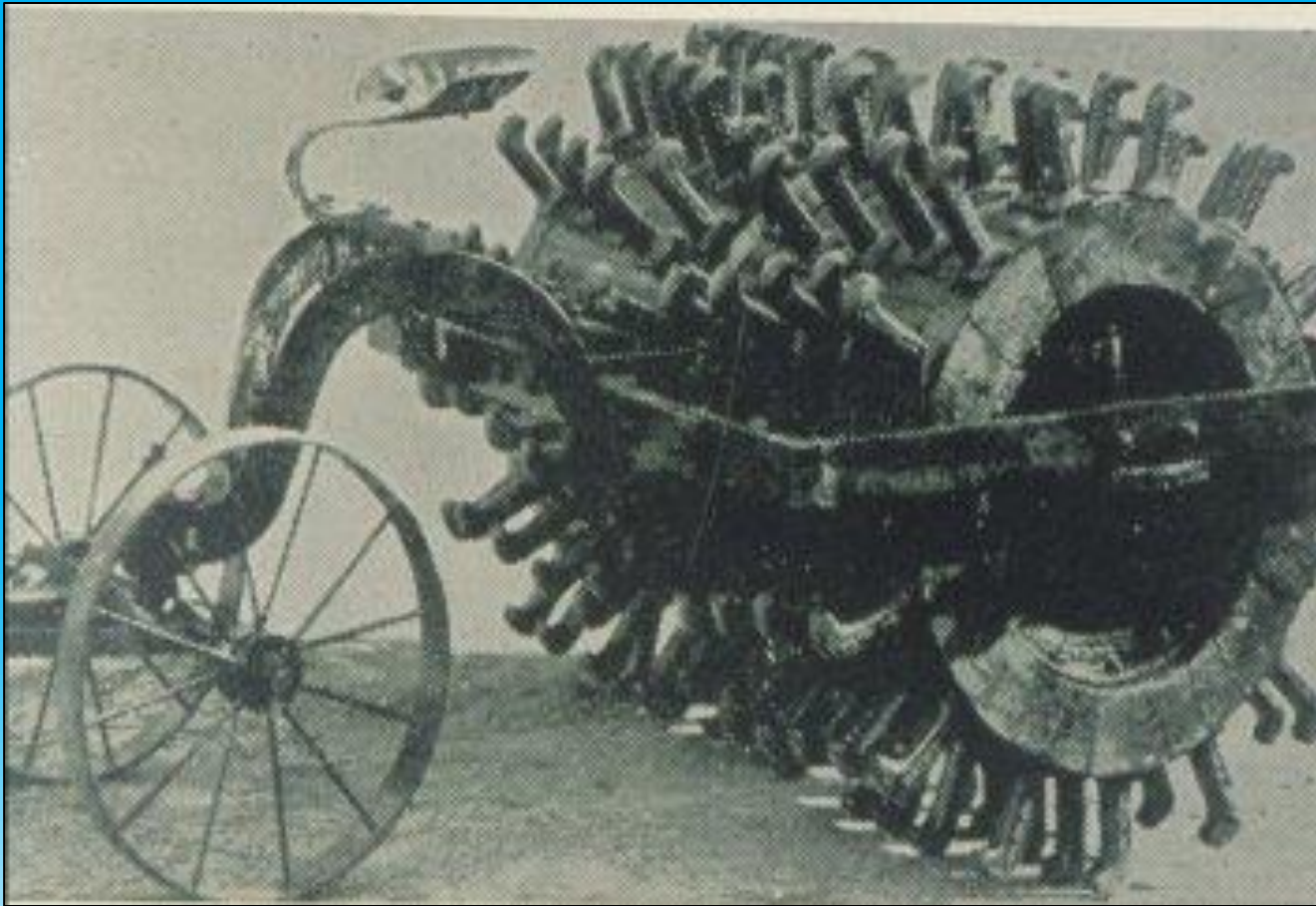
Tipos de compactadores:

- Compactador de rolo liso
- Compactador manual vibratório
- Compactador de pneu
- Compactador “pé de carneiro”.

Compactação no campo



Rolo pé-de-carneiro



O rolo pé-de-carneiro foi patenteado em 1904.

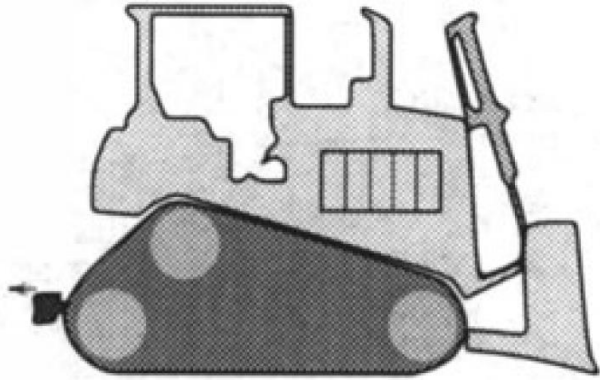
From J. David Rogers
University of Missouri-Rolla

O cilindro era preenchido com areia.

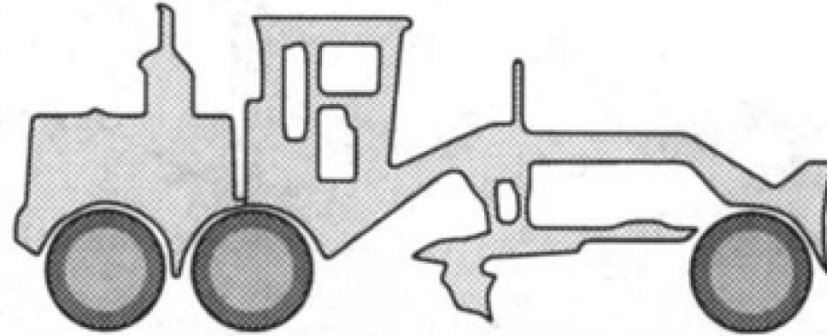
Rolo liso



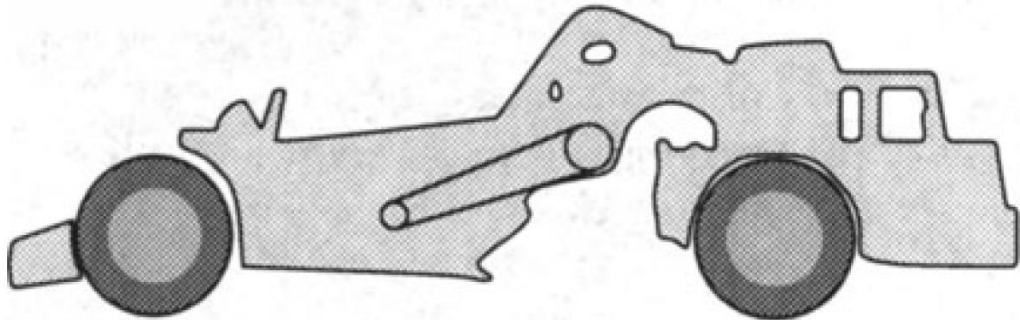
Equipamentos típicos



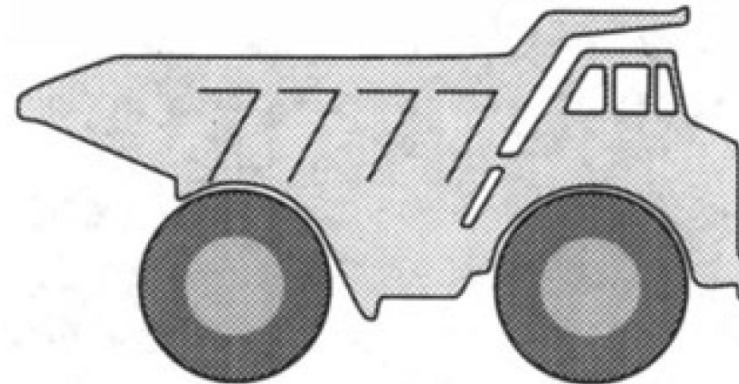
Dozer



Grader



Scraper



Dump-truck

Rolo Pé de Carneiro



Compactação Pneumática

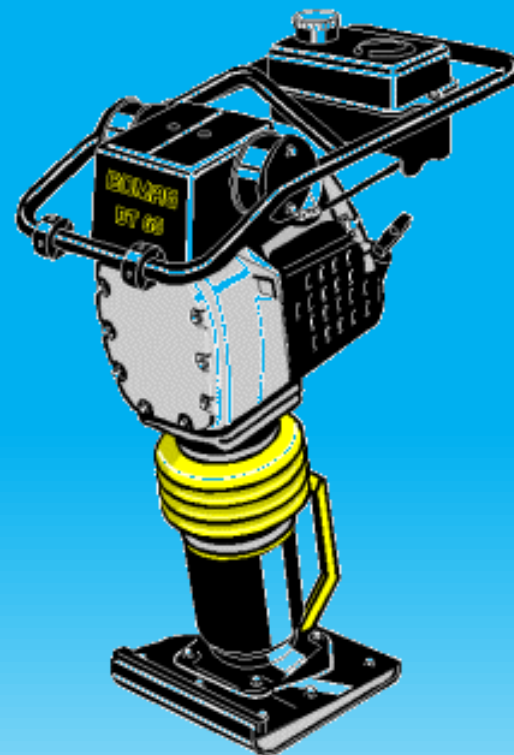


Rolo Liso





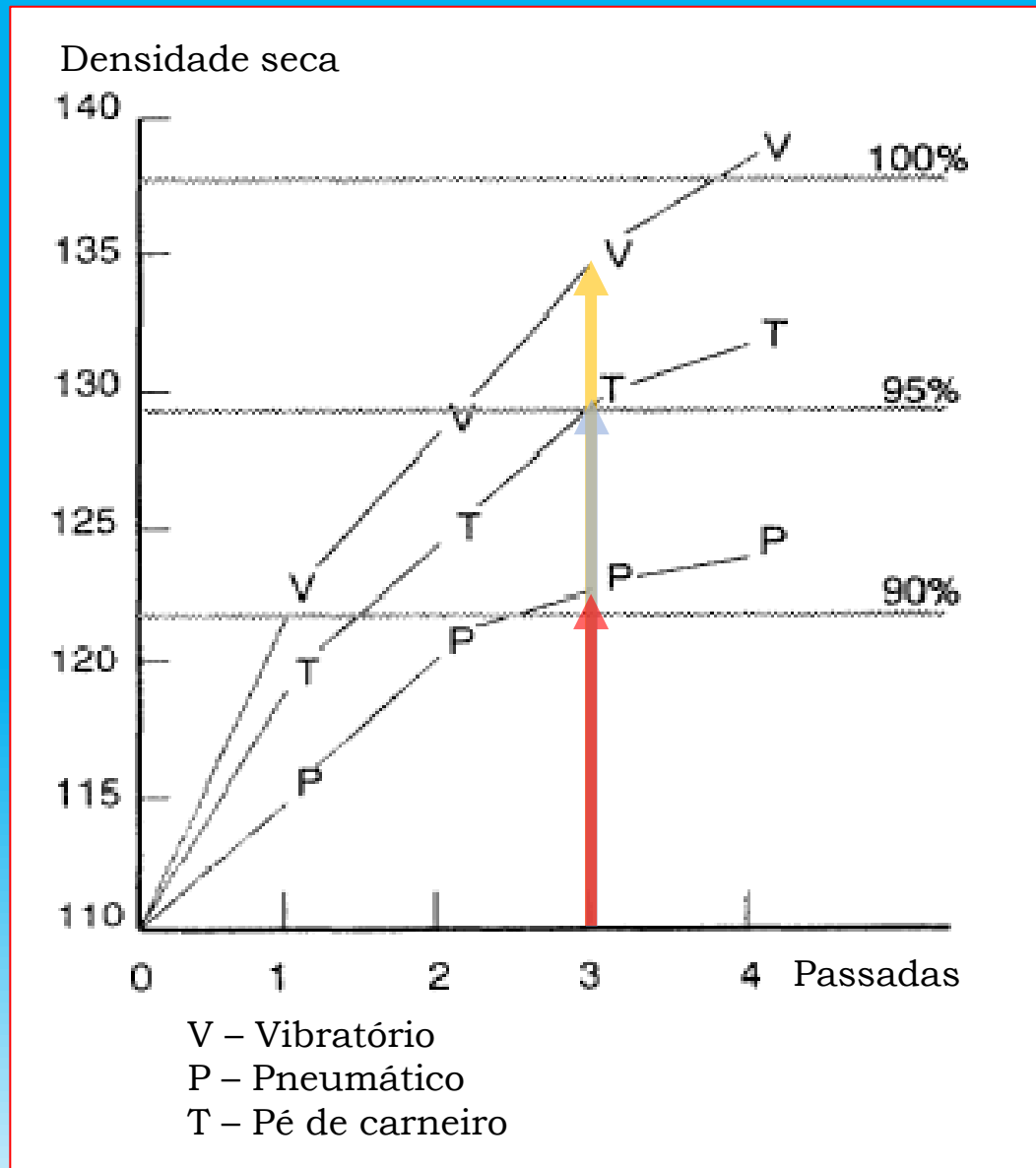
Manual



Compactação por impacto



Ajuste da energia no campo



Material Granular

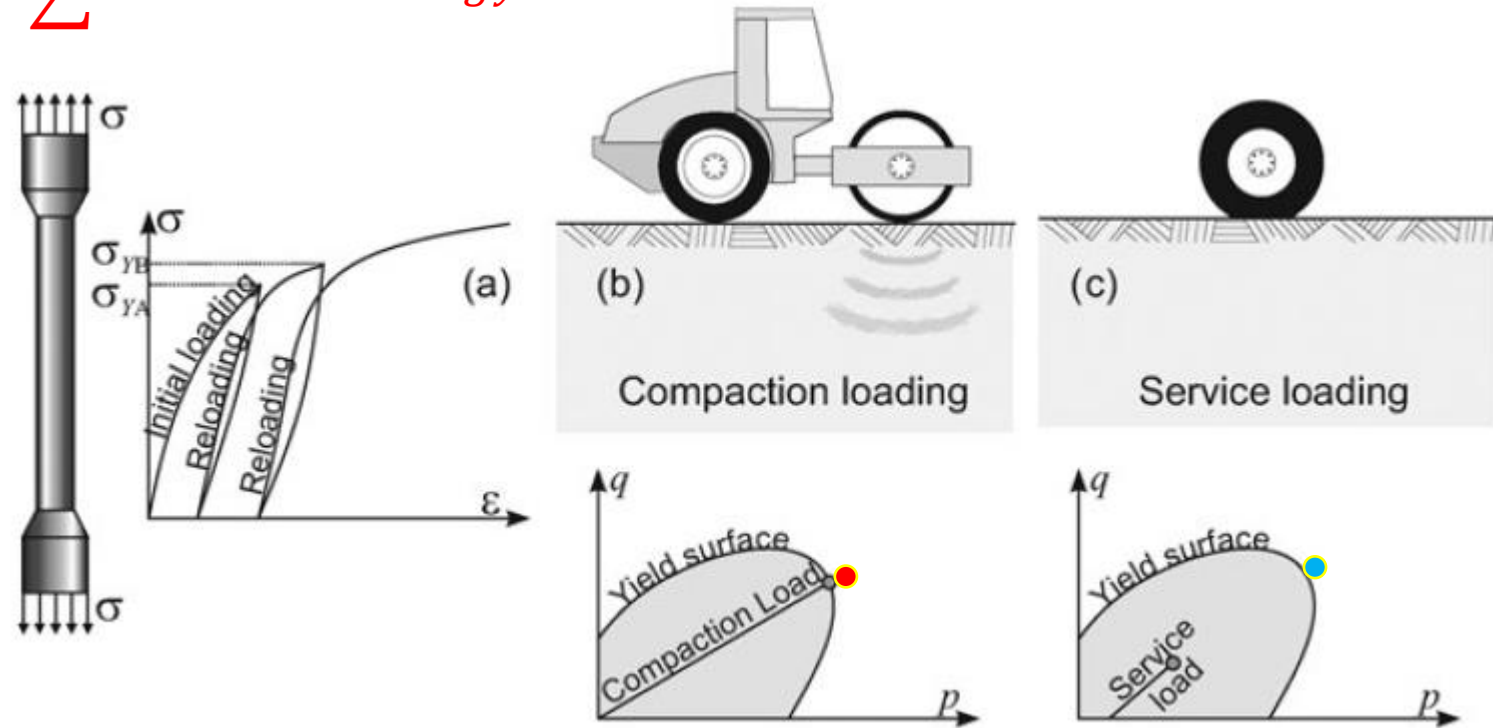
Compactação interpretada como um processo de “endurecimento do solo”

O que faz um equipamento de compactação?

Transfere energia para o solo devido ao seu peso e mobilidade.

As partículas do solo recebem tensões normais e de cisalhamento movendo-se para um arranjo específico.

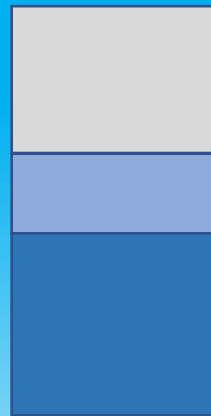
$$\sum \Delta E = Total\ Energy$$



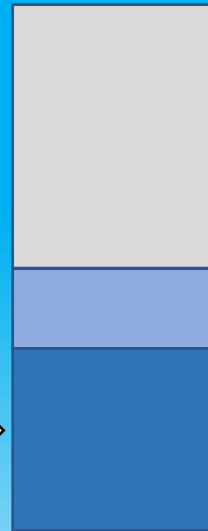
Altos níveis de tensões de compactação induzindo grandes deformações volumétricas

Apenas tensões elásticas aparecem durante a aplicação de cargas de serviço

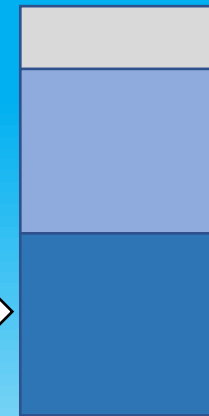
Estados do solo da jazida para o aterro



Escavação



Ajuste do teor de umidade



Estado natural na jazida

Estado do solo escavado

Estado do solo compactado

Ajuste de Teor de Umidade



Homogeneização do material lançado



Ajuste de Teor de Umidade



A observação ainda é um dos melhores métodos de controle.

Excesso de poeira é um indício de teor de umidade abaixo do ótimo.

Espessura da Camada Lançada



Especificação de Compactação

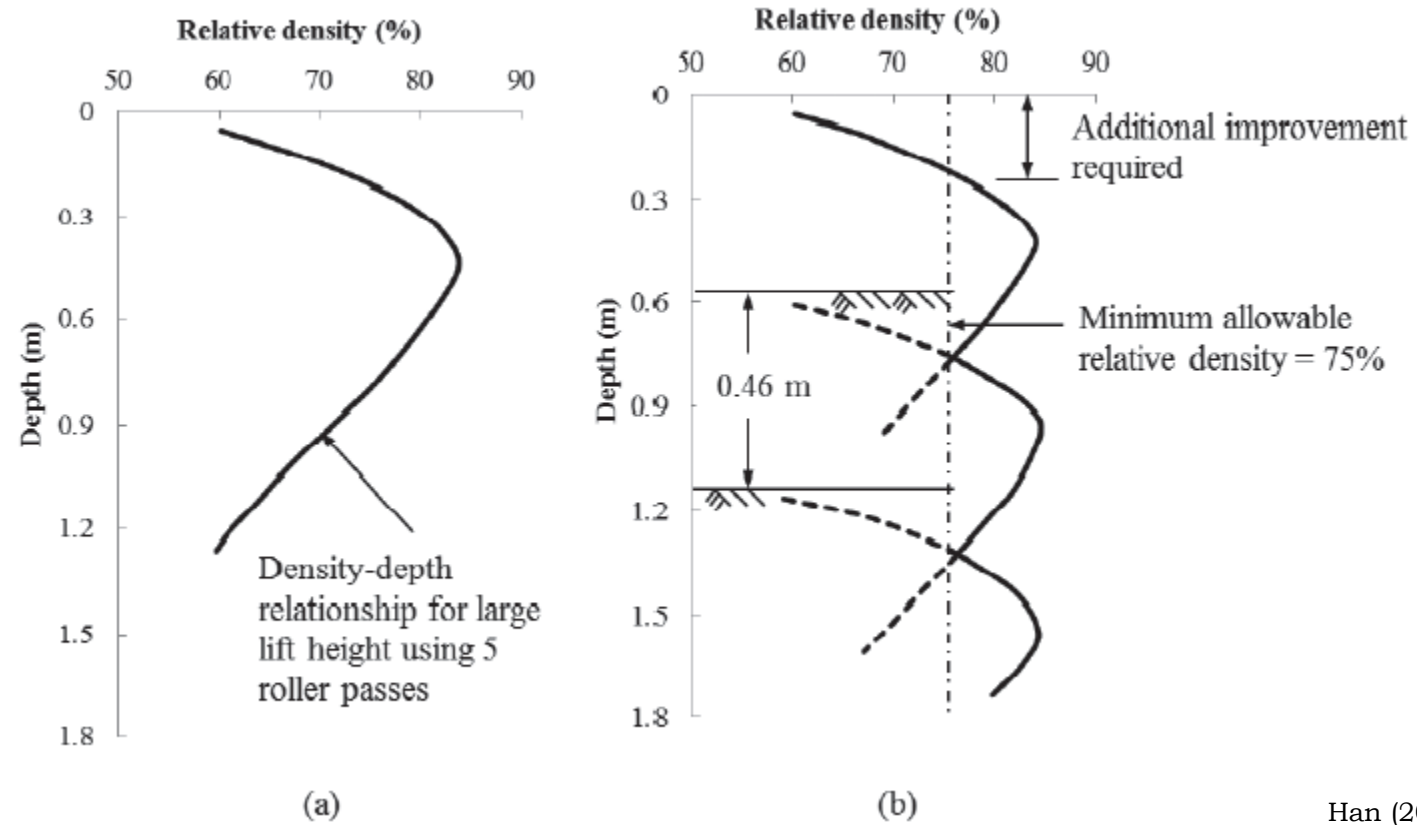
1. Especificação de execução

O que fazer e como fazer

2. Especificação de Performance

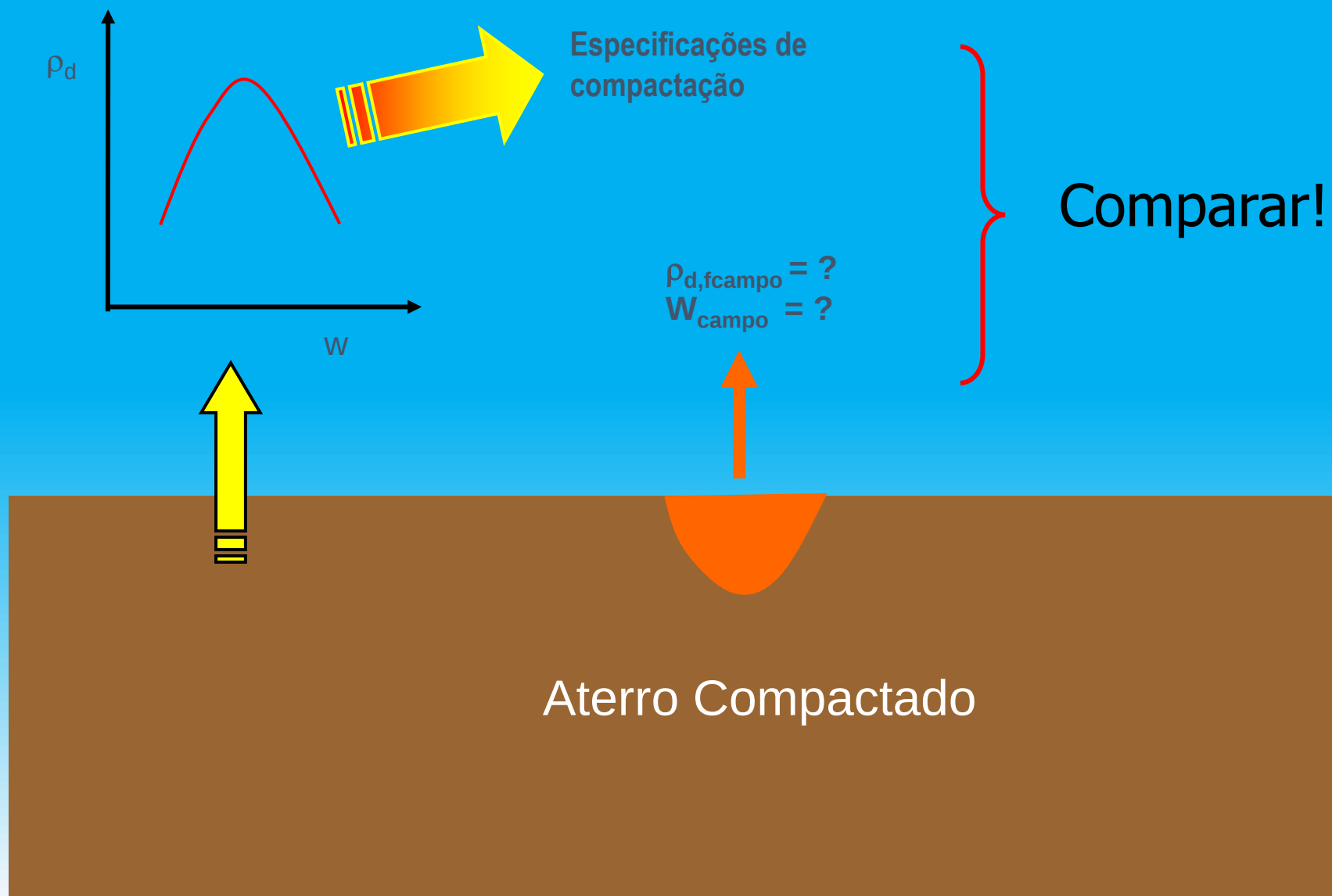
Controle de grau de compactação (ensaios)

Espessura das camadas lançadas



Han (2015)

Princípio do Controle de Compactação



Controle de Compactação

O controle de qualidade do aterro envolve os seguintes aspectos:

- Qualidade do material do aterro: tipo de material, distribuição granulométrica, limites de consistência.
- Tipo de peso do equipamento.
- Espessura da camada lançada
- Teor de umidade de compactação
- Número de passadas.

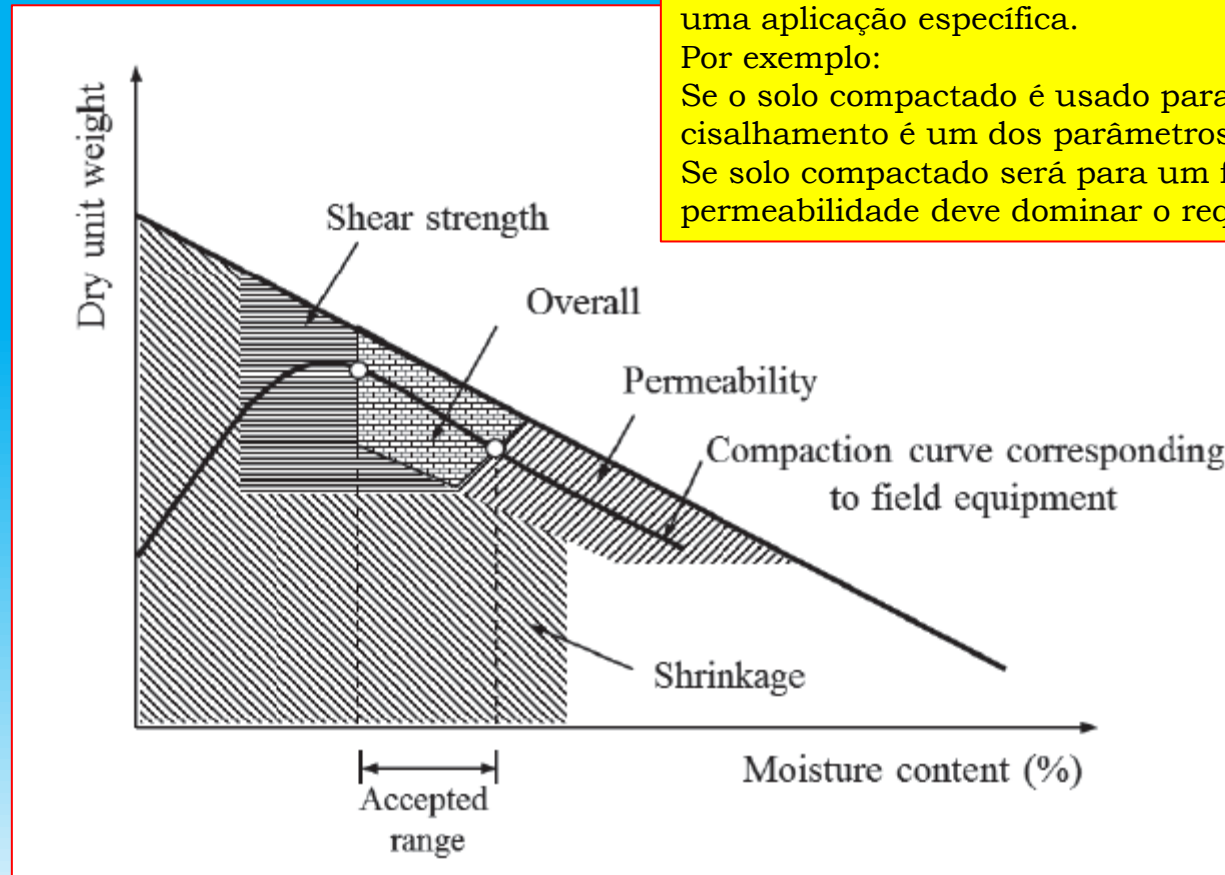
Table 3.3 Lift Thickness and Number of Passes for Different Compaction Equipment

Equipment Type	Applicability	Compacted Lift Thickness (mm)	Number of Passes
Sheepsfoot rollers	For fine-grained fills or coarse-grained fills with more than 20% fines	150	4–6 for fine-grained fills 6–8 for coarse-grained fills
Rubber tire roller	For clean, coarse-grained fills with 4–8% fines	250	3–5
	For fine-grained fills or well-graded coarse-grained fills with more than 8% fines	150–200	4–6
Smooth wheel rollers	Appropriate for subgrade or base course compaction of well-graded sand-gravel mixtures	200–300	4
	May be used for fine-grained fills other than earth dams	150–200	6
Vibrating sheepsfoot rollers	For coarse-grained fills and sand-gravel mixtures	200–300	3–5
Vibrating smooth drum rollers	For coarse-grained fills and sand-gravel mixtures—rock fills	200–300 (soil) to 900 (rock)	3–5 4–6
Vibrating plate compactors	For coarse-grained fills with less than 4–8% fines, placed thoroughly wet	200–250	3–4
Crawler tractor	Best suited for coarse-grained fills with less than 4–8% fines, placed thoroughly wet	150–250	3–4
Power tamper or rammer	For difficult access, trench backfill. Suitable for all inorganic fills	100–150 for silt or clay, 150 for coarse-grained fills	2

Source: Modified from U.S. Navy (1986).

Controle de Compactação

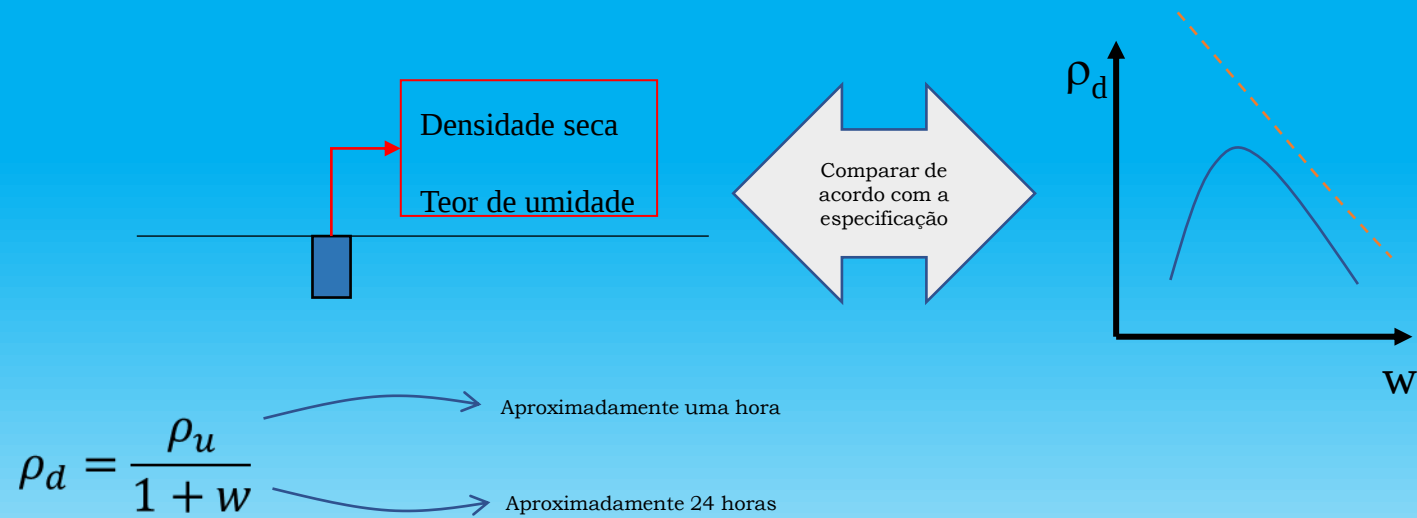
Zonas de aceitação do solo compactado em função da performance.



A compactação associada ao desempenho deve ser feita com base em uma aplicação específica.
Por exemplo:
Se o solo compactado é usado para taludes a resistência ao cisalhamento é um dos parâmetros mais importantes a ser considerado.
Se solo compactado será para um fundo de aterro sanitário a permeabilidade deve dominar o requisito de desempenho.

Controle de Compactação

O controle de compactação de solos coesivos não é apenas a determinação do teor de umidade e densidade seca do aterro. É necessária a comparação com os dados de compactação de laboratório



Controle indireto de compactação

Table 2 – List of the Operation Characteristics of the Devices

Features	NDG	SCS	Utility DCP	Geogauge	Clegg Hammer 10-Kg	Clegg Hammer 20-Kg	DCP	PANDA
Measurement	Wet & Dry Soil Density, Soil Moisture	Max. Attainable Compaction	Penetration (blow count)	Soil Stiffness & Young's Modules	Clegg Impact Value (IV)	Clegg Impact Value (IV)	Penetration (blow count)	Tip Resistance and Penetration
Moisture Readings	Yes , higher than oven-dried	No	No	No	No	No	No	No
Calibration of Device	Requires field calibration	Pre-set System	No	calibration plate	Factory calibrated	Factory calibrated	No	Factory calibrated
Portability ⁽¹⁾	Good	Good	Good	Good	Medium	Poor	Medium	Medium
Durability ⁽²⁾	Good	Box - Good Sensors – Fair	Good	Good	Poor	Poor	Good	Good
Standard Procedure	ASTM D-2922 ASTM D-3017	None	None	ASTM 6758	ASTM D-5874	ASTM D-5874	ASTM D-6951	(French Standard)
Operator skill	Licensed Technician	Worker	Worker	Worker	Worker	Worker	Worker	Technician
Ease of use- Training	Medium –Requires Training	Easy –Minimal training	Easy –Minimal training	Easy-Minimal training	Easy –Minimal training	Easy –Minimal training	Easy-Require data plotting	Medium-Extensive training
Initial Cost	About \$6,200	About \$1,650	About \$300	About \$5,300	About \$2,400	About 2,400	About \$900	About \$7,500

⁽¹⁾ Portability: Weight and ease of mobility on site

⁽²⁾ Durability: The device ability to withstand daily use without damage or breakdown

Controle indireto de compactação

Table 6 - The Compaction Measuring Devices

	Device	
1	Nuclear Density Gauge [NDG] [Troxler Model 3440]	
2	Sand-Cone Density Apparatus	
3	Soil Compaction Supervisor [SCS]	
4	Dynamic Cone Penetrometer [Utility DCP]	
5	Dynamic Cone Penetrometer [Standard DCP]	
6	Geogauge	
7	Clegg Hammers [10-kg & 20-kg Hammers]	
8	PANDA	

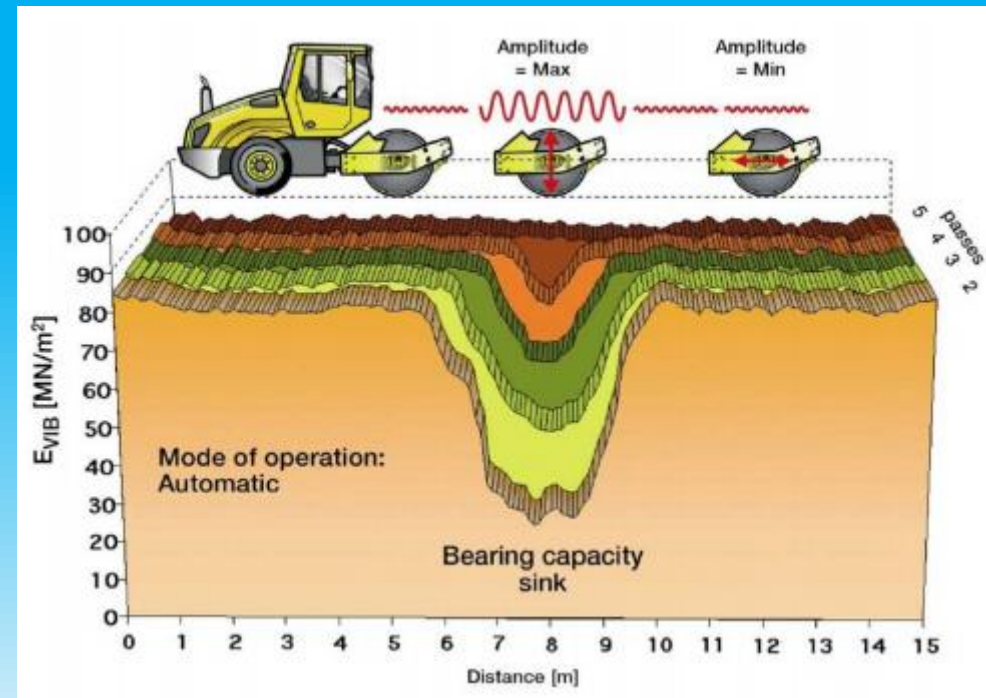
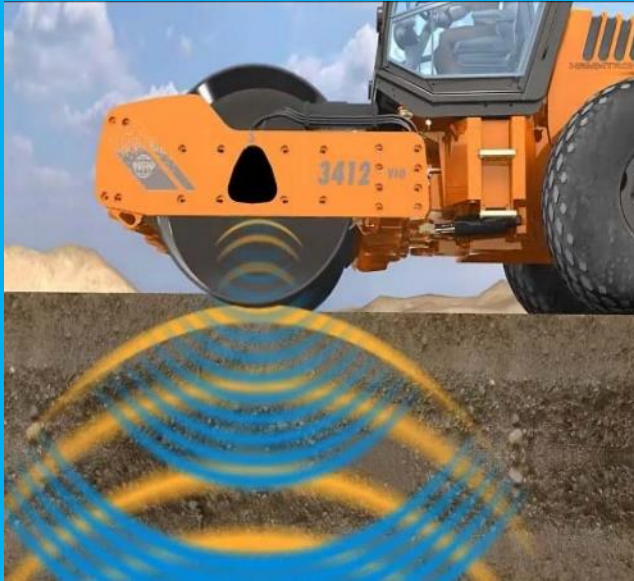
Light Drop-Weight tester



<http://tpj.com.my/hmp.html>



Controle de Compactação em Campo



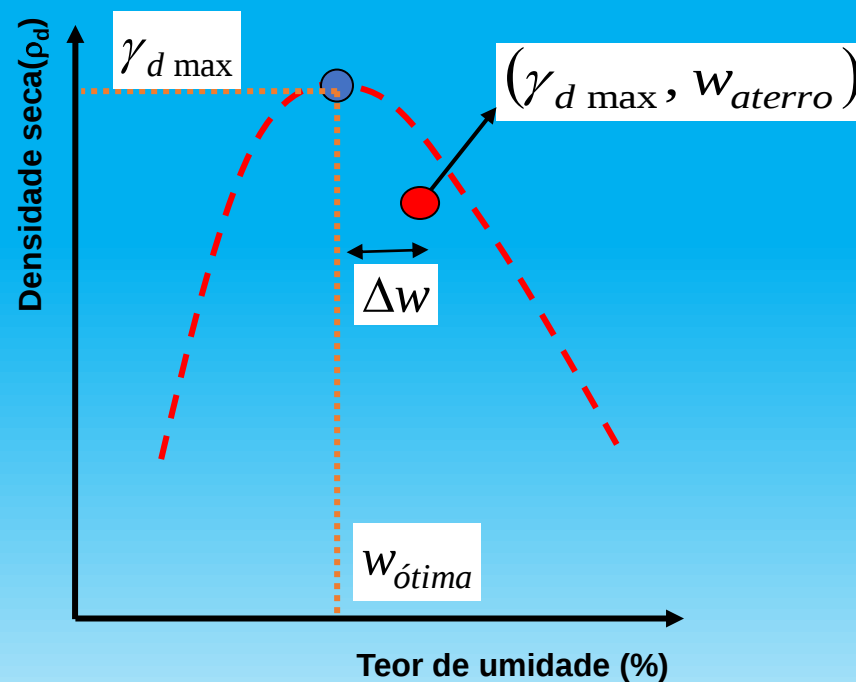
State of California Department of Transportation
(2015)

Objetivo do controle de compactação

- Evitar que uma camada inadequadamente compactada seja coberta por outra.

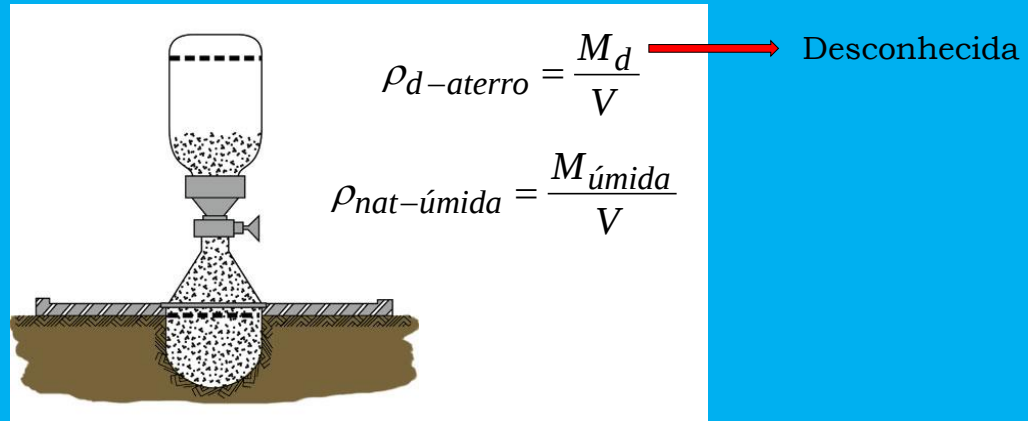
$$G.C. = \frac{\gamma_{d \text{ aterro}}}{\gamma_{d \text{ max}}}$$

$$\Delta w = w_{\text{aterro}} - w_{\text{ótima}}$$



Determinação da densidade úmida no campo

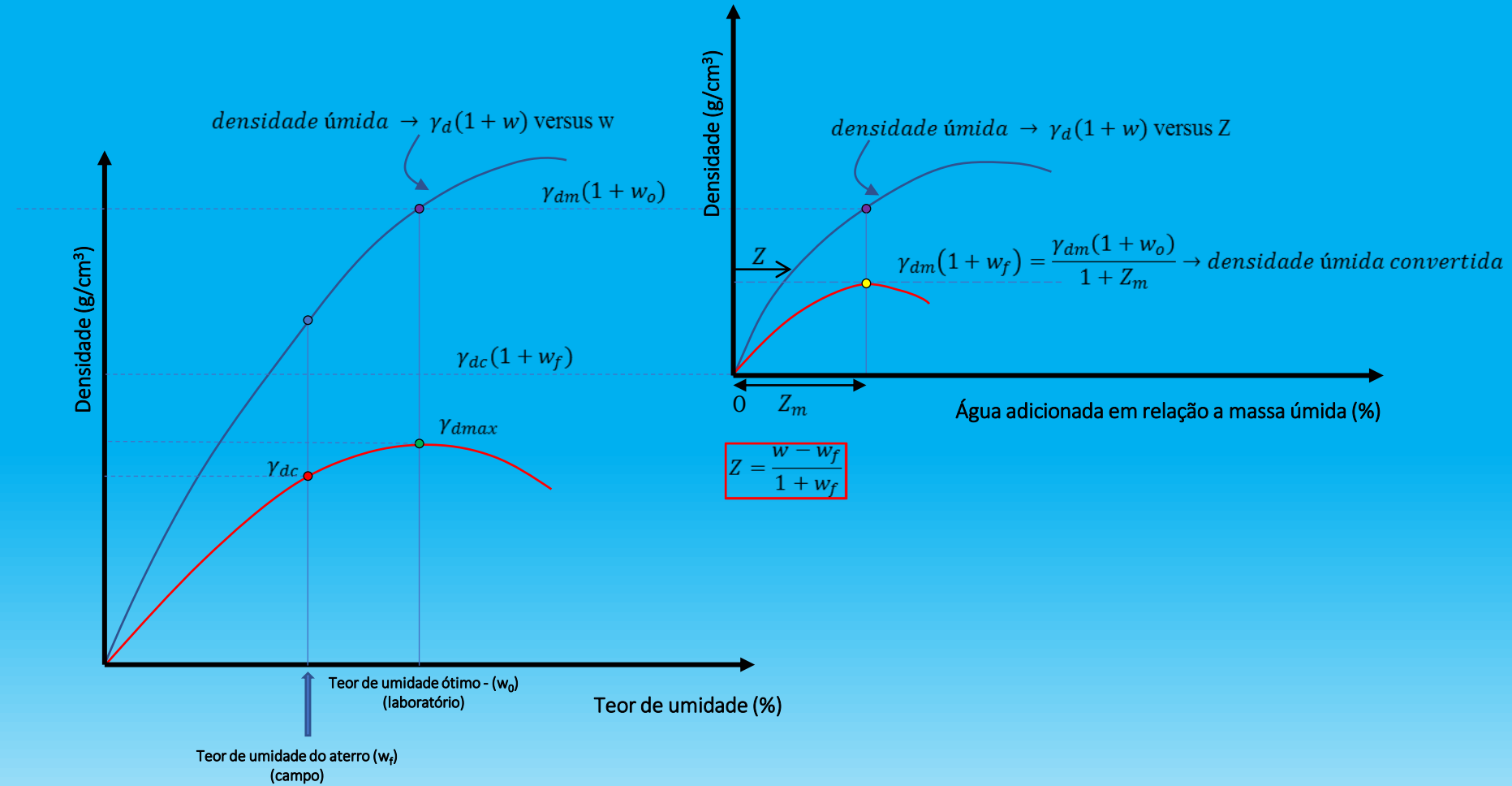
Método de Hilf



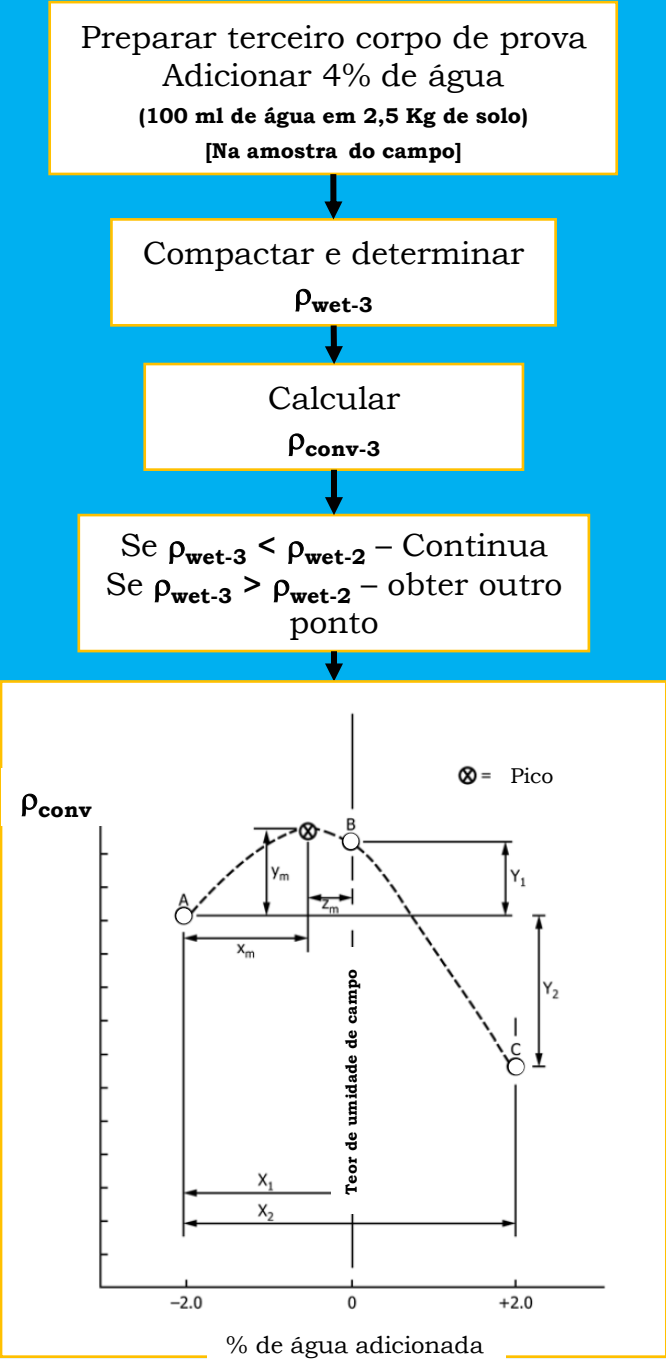
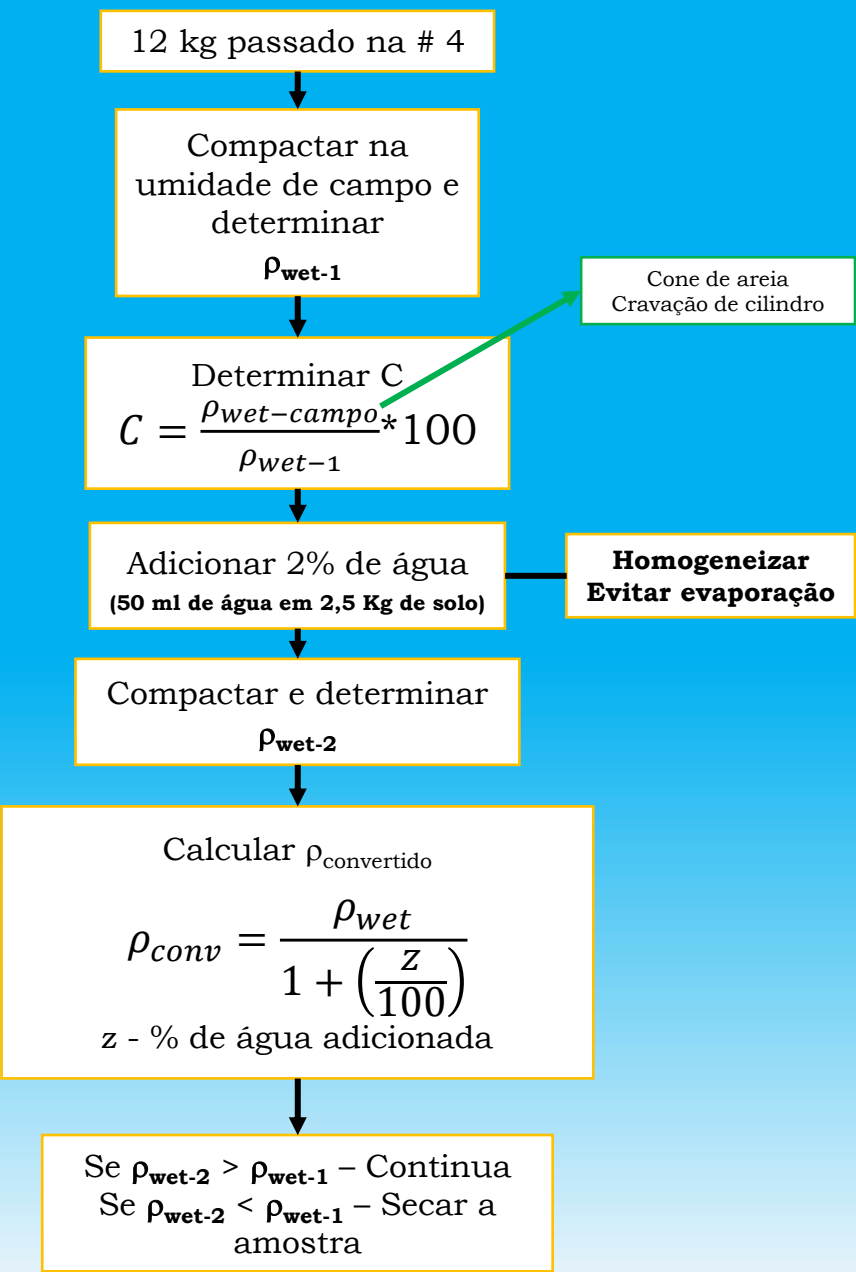
- Retirar amostra na região da determinação da densidade de campo
- Aproximadamente 3,5 kg por ponto
- Mínimo de três pontos

Controle de Compactação

Método de Hilf



Controle de Compactação por Hilf - ASTM



Controle de Compactação por Hilf

Grau de Compactação

$$D = \frac{\rho_{\text{wet-campo}}}{\rho_m} \cdot 100$$

Determinar D

Calcular

x_m

$$x_m = \frac{1}{2} \left[x_1 + \frac{(x_2 - x_1) \left(\frac{y_1}{x_1} \right)}{\left(\frac{y_1}{x_1} \right) - \left(\frac{y_2}{x_2} \right)} \right]$$

Calcular

$$Z_m = x_A + x_m$$

Calcular

y_m

$$y_m = \frac{-(x_m^2 y_1)}{x_1(x_1 - 2x_m)}$$

Calcular

$$\rho_m = y_A + y_m$$

Calcular

$$w_f - w_o = -(Z_m + MA)$$

Desvio de umidade

